

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**Rehabilitación e incremento de potencia de una
subestación de tracción de corriente continua**

AUTOR: Eva Vergel Medina

TUTOR: Lorenzo Muñoz Pascual

Leganés, 1 de agosto de 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a mi tutor, Lorenzo Muñoz, por la confianza depositada en mí al elegirme para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado y al Departamento de Ingeniería Eléctrica por la coordinación y organización en la asignación de este.

He de reconocer que han sido unos largos meses de trabajo, de cambios y correcciones constantes, muchas veces frustrantes, pero que se han hecho mucho más llevaderos gracias a las personas que me han acompañado cada día. Su apoyo, su paciencia y sus ánimos son los culpables de que haya terminado este Trabajo Fin de Grado.

Gracias a mi madre, porque una gran parte de todo esto es suya.

A mi hermana por aprender a convivir conmigo, incluso en los periodos de exámenes.

A mi abuela Jerónima por su ánimo y apoyo constante.

Gracias a mis amigos de toda la vida, sobre todo a Nuria y Óscar, a la primera por tener casi más confianza en mí que en ella misma, al segundo por ayudarme siempre en todo lo que puede.

Gracias a mis amigos de la universidad, con los que tantos momentos he compartido en estos cinco años, en la residencia y en las aulas, y de los que con tanta pena me despido, aunque por suerte no de todos.

Y por último gracias a ti, Alberto, porque siempre me haces mirar más lejos.

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se pretende realizar un estudio de la tracción eléctrica ferroviaria, analizando su historia y evolución, las distintas tecnologías existentes y las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas y de sus posibles configuraciones.

Se profundizará en los sistemas de electrificación en corriente continua, describiendo su funcionamiento y sus posibles configuraciones con mayor detalle, así como las mejoras introducidas hasta el momento.

Por último, de una forma más detallada, se realizará un proyecto de rehabilitación de una subestación de tracción en corriente continua y se incluirá un manual de operación de la misma. Esta rehabilitación consistirá en un aumento de potencia llevado a cabo mediante la sustitución de tres grupos transformadores-rectificadores, ya existentes, por dos del doble de potencia.

ABSTRACT

The present end-of Degree assignment covers the study of the electrical railway traction through its history and evolution as well as through the different existing technologies analysing the advantages and disadvantages of each of them and their possible configurations.

The electrification systems on direct current will be covered in depth describing their way of functioning and their possible configurations in detail as well as the improvements that have undergone until present time.

At a last stage, a project on the refurbishment of a direct current traction substation will be undertaken with its corresponding operations manual. This refurbishment will consist of an increase of the power level based on the replacement of three, already existing, transformer-rectifier groups against two groups of double power.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 1 |
| 1.3. FASES DEL DESARROLLO..... | 2 |
| 1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA | 2 |
| CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE | 4 |
| 2.1. DESARROLLO DEL SISTEMA FERROVIARIO ESPAÑOL | 4 |
| 2.2. TRACCIÓN ELÉCTRICA FERROVIARIA | 5 |
| 2.2.1. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN TRACCIÓN ELÉCTRICA | 6 |
| 2.2.2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA | 8 |
| 2.2.3. CIRCUITO ELÉCTRICO DE TRACCIÓN FERROVIARIA..... | 9 |
| 2.3. SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN EN CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA | 10 |
| 2.3.1. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA | 11 |
| 2.3.2. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN EN CORRIENTE ALTERNA..... | 15 |
| 2.3.3. COMPARATIVA ENTRE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA. VENTAJAS E INCONVENIENTES | 18 |
| 2.4. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA | 19 |
| 2.4.1. PROYECTO FERROLINERA 3.0..... | 19 |
| 2.4.2. PROYECTO METROLINERA | 20 |
| 2.4.3. SISTEMA INGEBER..... | 21 |
| 2.4.4. ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN VOLANTES DE INERCIA..... | 22 |
| 2.4.5. TRANVÍAS SIN CATENARIA | 24 |
| CAPÍTULO 3 DIMENSIONADO ELÉCTRICO..... | 25 |
| 3.1. DATOS DE PARTIDA..... | 25 |
| 3.2.1. INTENSIDADES NOMINALES..... | 25 |
| 3.2.2. INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO | 29 |
| 3.2.3. INTENSIDADES DE SOBRECARGA | 42 |
| 3.2.4. RESULTADOS..... | 43 |
| 3.3. JUSTIFICACIÓN DE CABLES Y EMBARRADOS..... | 44 |
| 3.3.1. EMBARRADO GENERAL DEL PARQUE DE 45 kV (COMPAÑÍA) | 44 |
| 3.3.2. EMBARRADO GENERAL DEL PARQUE DE 45 kV (ADIF) | 46 |
| 3.3.3. CONDUCTOR DE ENTRADA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA | 48 |
| 3.3.4. PLETINA DE COBRE ENTRE TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y RECTIFICADOR..... | 50 |
| 3.3.5. PLETINA DE COBRE EN BARRA ÓMNIBUS | 52 |

| | |
|--|---------------|
| 3.4. CÁLCULO DE LA RED DE TIERRAS | 55 |
| 3.4.1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO | 55 |
| 3.4.2. CORRIENTES MÁXIMAS DE PUESTA A TIERRA Y TIEMPO MÁXIMO DE ELIMINACIÓN DEL DEFECTO. | 56 |
| 3.4.3. CÁLCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO MÁXIMAS PERMITIDAS | 57 |
| 3.4.4. DISEÑO DEL SISTEMA COMPROBANDO QUE NO SE SUPERAN LOS MÁXIMOS ADMISIBLES..... | 58 |
| 3.4.5. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA | 60 |
| 3.5. ELECCIÓN DEL PARARRAYOS | 62 |
| 3.5.1. PARÁMETROS A CONSIDERAR EN LA ELECCIÓN DEL PARARRAYOS | 62 |
| 3.5.2. ELECCIÓN FINAL..... | 64 |
| CAPÍTULO 4 DEFINICIÓN DE APARAMENTA | 70 |
| 4.1. INSTALACIONES DE 45 kV | 70 |
| 4.1.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA | 70 |
| 4.1.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ADIF..... | 71 |
| 4.2. INSTALACIONES DE 1,3 kV | 75 |
| CAPÍTULO 5 MANUAL DE OPERACIÓN. SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO MEDIANTE PLCS | 80 |
| 5.1. GENERALIDADES | 80 |
| 5.2. PLCs LÍNEA DE ACOMETIDA..... | 82 |
| 5.2.1. MANIOBRAS..... | 83 |
| 5.2.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS..... | 84 |
| 5.3. PLCs SERVICIOS AUXILIARES-MEDIDA | 84 |
| 5.3.1. MANIOBRAS..... | 86 |
| 5.3.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS..... | 86 |
| 5.4. PLCs GRUPO TRANSFORMADOR RECTIFICADOR..... | 87 |
| 5.4.1. MANIOBRAS..... | 88 |
| 5.4.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS..... | 89 |
| 5.5. PLCs SALIDA DE FEEDER | 90 |
| 5.5.1. MANIOBRAS..... | 91 |
| 5.5.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS..... | 92 |
| 5.6. PLCs PÓRTICO DE SECCIONADORES..... | 93 |
| 5.6.1. MANIOBRAS..... | 94 |
| 5.6.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS..... | 94 |
| 5.7. PLCs PUESTO DE CONTROL CENTRALIZADO..... | 95 |
| CAPÍTULO 6 PRESUPUESTO | 97 |

| | |
|---|------------|
| 6.1. INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN..... | 97 |
| 6.2. INSTALACIONES DE POTENCIA..... | 99 |
| 8.3. RESUMEN..... | 104 |
| CAPÍTULO 7 PLANIFICACIÓN | 105 |
| CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 106 |
| BIBLIOGRAFÍA | 108 |
| ANEXO. PLANOS..... | 111 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Pantógrafo en contacto con la catenaria..... | 6 |
| Figura 2. Sistema general de electrificación ferroviaria..... | 7 |
| Figura 3. Vista general de la línea aérea de contacto | 8 |
| Figura 4. Distintos elementos en línea aérea de contacto..... | 9 |
| Figura 5. Circuito eléctrico de tracción ferroviaria | 9 |
| Figura 6. Sistema de electrificación 1x3000 Vcc | 13 |
| Figura 7. Sistema 1x25 kV con cable de retorno..... | 16 |
| Figura 8. Conexión de los transformadores en el sistema 2x25 kV | 16 |
| Figura 9. Sistema de alimentación 2x25 kV con autotransformadores | 17 |
| Figura 10. Primera ferrolinera de ADIF en la estación María Zambrano (Málaga)..... | 20 |
| Figura 11. Metrolinera de Sainz de Baranda | 21 |
| Figura 12. Esquema de funcionamiento del sistema INGEBER | 22 |
| Figura 13. Volante de inercia | 23 |
| Figura 14. Tranvía sin catenaria en Zaragoza..... | 24 |
| Figura 15. Ramificaciones de la corriente nominal de la subestación..... | 27 |
| Figura 16. Puntos de cálculo de cortocircuitos..... | 29 |
| Figura 17. Cortocircuito en barra Ómnibus..... | 32 |
| Figura 18. Sistema de arrastres..... | 33 |
| Figura 19. Esquema eléctrico para el cálculo de la corriente de cortocircuito | 33 |
| Figura 20. Tensiones relativas de cortocircuito..... | 35 |
| Figura 21. Circuito equivalente para el cálculo del cortocircuito en barra Ómnibus..... | 40 |
| Figura 22. Fuentes cortocircuitadas..... | 41 |
| Figura 23. Simplificación del circuito | 41 |
| Figura 24. Gráfica de tiempo frente a corriente para el cable RAIL..... | 46 |
| Figura 25. Gráfica de tiempo frente a corriente para el Cable Cu 120..... | 48 |
| Figura 26. Gráfica de tiempo frente a corriente para el tubo 40/36..... | 50 |
| Figura 27. Gráfica de tiempo frente a corriente para la pletina 80x 10..... | 52 |
| Figura 28. Gráfica de tiempo frente a corriente para la pletina de barra Ómnibus | 54 |
| Figura 29. Dimensiones de la malla | 61 |
| Figura 30. Gráfico pararrayos INAEL..... | 67 |
| Figura 31. Transformadores de intensidad en la subestación de Villaverde Alto | 72 |
| Figura 32. Aparamenta para la protección general de la subestación de Villaverde Alto | 73 |
| Figura 33. Trafos de intensidad para protección y medida de los grupos transformadores. Villaverde Alto | 74 |
| Figura 34. Esquema eléctrico unifilar de L.A.C..... | 78 |
| Figura 35. División de la subestación en bloques. Edición propia..... | 81 |
| Figura 36. Elementos del PLC..... | 81 |
| Figura 37. Esquema unifilar de línea de acometida | 82 |
| Figura 38. Esquema de enclavamientos de la línea de acometida..... | 84 |
| Figura 39. Esquema unifilar del bloque de SS.AA. | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 40. Esquema de enclavamientos de equipos de medida de energía | 86 |
| Figura 41. Esquema de enclavamientos para SS.AA. | 87 |
| Figura 42. Esquema unifilar del bloque transformador-rectificador | 88 |
| Figura 43. Enclavamientos mecánicos grupo transformador-rectificador..... | 90 |
| Figura 44. Esquema unifilar del bloque de salida de feeder..... | 91 |
| Figura 45. Enclavamientos mecánicos. Bloque de salida de feeder | 93 |
| Figura 46. Esquema unifilar del bloque de pórtico de seccionadores | 93 |
| Figura 47. Enclavamientos mecánicos del pórtico de seccionadores | 95 |
| Figura 48. Topología del Bus de comunicaciones. Edición propia. | 96 |
| Figura 49. Diagrama de Gantt | 105 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Sistemas 1x3000 y 2x3000. Comparativa | 15 |
| Tabla 2. Sistemas 1x25 y 2x25 kV. Comparativa. | 18 |
| Tabla 3. Datos de partida..... | 25 |
| Tabla 4. Parámetros para el cálculo del corto en barra Ómnibus..... | 40 |
| Tabla 5. Resultados | 43 |
| Tabla 6. Datos de partida del cable RAIL | 45 |
| Tabla 7. Ficha técnica del cable RAIL | 45 |
| Tabla 8. Capacidad de sobrecarga del cable RAIL | 45 |
| Tabla 9. Datos de partida del cable Cu 120..... | 47 |
| Tabla 10. Ficha técnica del cable Cu 120..... | 47 |
| Tabla 11. Capacidad de sobrecarga del cable Cu 120 | 47 |
| Tabla 12. Datos de partida del tubo..... | 48 |
| Tabla 13. Ficha técnica del tubo..... | 49 |
| Tabla 14. Capacidad de sobrecarga del tubo | 49 |
| Tabla 15. Datos de partida de la pletina | 51 |
| Tabla 16. Ficha técnica de la pletina | 51 |
| Tabla 17. Capacidad de sobrecarga de la pletina..... | 51 |
| Tabla 18. Datos de partida de la pletina de barra Ómnibus..... | 53 |
| Tabla 19. Ficha técnica de la pletina de barra Ómnibus..... | 53 |
| Tabla 20. Capacidad de sobrecarga de la pletina de barra Ómnibus..... | 53 |
| Tabla 21. Resistividad en función del terreno | 56 |
| Tabla 22. Intensidad y tiempo de defecto..... | 57 |
| Tabla 23. Cálculo de las tensiones de paso y contacto máximas admisibles | 58 |
| Tabla 24. Diseño final de puesta a tierra | 60 |
| Tabla 25. Fórmulas de cálculo de la resistencia de tierra..... | 60 |
| Tabla 26. Resultados del cálculo de la resistencia de puesta a tierra | 62 |
| Tabla 27. Pararrayos INAEL | 65 |
| Tabla 28. Niveles de aislamiento. MIE RAT 12 | 68 |
| Tabla 29. Características de funcionamiento del pararrayos ZS. INAEL | 69 |
| Tabla 30. Planificación de tareas..... | 105 |



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo Fin de Grado se pretende abordar el estudio de la tracción eléctrica ferroviaria de una forma general, profundizando en los sistemas de electrificación en corriente continua y en las subestaciones de tracción empleadas para tal fin.

El sector del transporte en España es uno de los más influyentes en la economía del país. La comunicación entre provincias y el transporte de mercancías y pasajeros es una prioridad competente a épocas pasadas, presentes y futuras, que pretende ser mejorada con el paso del tiempo. Concretamente, el transporte por ferrocarril ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años y, lo que es más importante, todo apunta a que lo seguirá haciendo en el futuro, llegando a ser un elemento determinante en la calidad de vida del país.

Por lo tanto es un problema actual y resulta conveniente su estudio, para comprender su funcionamiento, analizar los fallos cometidos y optimizar mejor su desarrollo futuro.

1.2. OBJETIVOS

En este Trabajo Fin de Grado se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Estudiar de forma general la historia y evolución del ferrocarril en España, atendiendo a las nuevas líneas de trabajo que se desarrollan actualmente en materia de ahorro energético.
- Conocer las distintas formas de electrificación presentes en la tracción ferroviaria, cada una de sus configuraciones posibles y las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.
- Hacer un estudio más específico sobre las subestaciones de tracción en corriente continua, su funcionamiento y los elementos que las componen.
- Plantear la rehabilitación de una subestación en corriente continua mediante un incremento de potencia en la misma. Para ello se pretenden realizar los cálculos pertinentes: estudio de las corrientes en la instalación, cables y embarrados, red de tierras, elección del pararrayos, etc.
- Desarrollar un manual de operación para la subestación, así como un presupuesto aproximado del mismo.



1.3. FASES DEL DESARROLLO

Para el desarrollo de este trabajo se comenzó con la recopilación de una gran cantidad de información sobre tracción eléctrica ferroviaria, siguiendo la bibliografía incluida en este documento.

Una vez realizada la parte más general del trabajo, se profundizó más en la parte específica, el estudio de una subestación de tracción en corriente continua y a qué partes afectaría la rehabilitación de la misma.

Después, se desarrolló el manual de operación de la subestación basándolo en manuales ya existentes que son nombrados en la bibliografía.

Por último, una vez analizados y desarrollados los temas más importantes se procedió a hacer un presupuesto aproximado y a extraer una serie de conclusiones.

1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Con objeto de facilitar la lectura de este Trabajo Fin de Grado, se incluye a continuación un breve resumen por capítulos.

Capítulo 1: Introducción y objetivos

En este primer capítulo se describen las motivaciones y objetivos de este trabajo, cuáles serán los temas a tratar, como se analizarán y cuáles serán las fases seguidas en el desarrollo del mismo.

Capítulo 2: Estado del arte

Este capítulo pretende revisar la historia de la tracción ferroviaria así como el futuro de esta y las líneas de investigación abiertas.

Además se estudian los distintos tipos de subestaciones de tracción en función del tipo de electrificación, sus elementos, las configuraciones posibles y las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Capítulo 3: Cálculos

En el tercer capítulo se exponen todos los cálculos necesarios para la reforma de la subestación, como son el cálculo de las distintas corrientes -nominales, sobrecarga y cortocircuito-, los cables y embarrados a utilizar en la subestación, el diseño de la red de tierras y la elección del pararrayos adecuado.

Capítulo 4: Definición de aparamenta

En este capítulo se describe, de forma más detallada, la aparamenta a utilizar en la subestación incluyendo su función, características básicas y fabricante.



Capítulo 5: Manual de operación

En el quinto capítulo se describe el control automatizado de la subestación mediante el uso de PLC's haciendo hincapié en las maniobras y enclavamientos de cada uno de los bloques de control en los que se encuentra dividida la subestación.

Capítulo 6: Presupuesto

En este capítulo se desarrolla un presupuesto aproximado del proyecto de rehabilitación de la subestación, centrándose en aspectos eléctricos y omitiendo todo lo relacionado con obra civil.

Capítulo 7: Planificación

En este capítulo se exponen las distintas tareas e hitos a completar en el desarrollo del trabajo y el tiempo empleado en cada uno.

Capítulo 8: Conclusión y trabajos futuros

Una vez finalizado este Trabajo Fin de Grado, se detallan las conclusiones extraídas durante la realización del mismo y se establecen las pautas, o posibles vías de investigación, para una posible ampliación futura de dicho trabajo.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. DESARROLLO DEL SISTEMA FERROVIARIO ESPAÑOL

El ferrocarril nace a mediados del siglo XVII como un medio de transporte industrial y no de pasajeros. Concretamente para el transporte de carbón en las minas de Inglaterra y Alemania. El primer servicio de transporte ferroviario se registra en el año 1825 cuando se inaugura en Inglaterra la línea Stockton-Darlington. [1] Pero hubo que esperar hasta 1830, año en que se abrió la línea de Liverpool a Manchester, para demostrar las grandes posibilidades de este nuevo sistema de transporte, primero en el Reino Unido, después en los Estados Unidos de América y más tarde en el continente europeo como medio de transporte útil y mejor que los existentes.

Los inicios en España fueron más tardíos. En 1829 se presentó la primera solicitud de construcción de una línea ferroviaria en España con el objeto de enlazar Jerez de la Frontera con el muelle del Portal, para transportar vino, pero nunca llegó a construirse, al igual que otros muchos proyectos iniciales.

En 1830 se concede permiso para la construcción de un ferrocarril en Cuba (entonces colonia española) inaugurándose en noviembre de 1837 la línea de la Habana-Bejucal.

En 1848 llega el ferrocarril a la península inaugurándose la línea Barcelona-Mataró, de unos 29 km.

Siete años después, en 1855 se aprueba la Ley de Ferrocarriles - más conocida como Ley General de Caminos de Hierro - que dará paso a la "fiebre del ferrocarril" y a la creación en España de una serie de compañías de explotación ferroviaria. Entre ellas destacan la Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA) junto con su gran antagonista - la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España-. [2]

A comienzos del siglo XX se contaba con 15000 km de vía aproximadamente, pero el desarrollo se vio frenado por las grandes dificultades económicas, marcadas principalmente por la subida del precio del carbón debido a la primera guerra mundial. En la década de los 30, la crisis económica y la Guerra Civil terminaron por hundir a las empresas españolas de ferrocarril.

En 1941 nace la Red de los Ferrocarriles Españoles (RENFE) tras la aprobación de la Ley de Bases de Ordenación Ferroviaria y de los Transportes por Carretera. El objetivo de esta nueva compañía era rescatar y aglutinar a las distintas empresas ferroviarias

arruinadas y reconstruir las instalaciones ferroviarias que habían sido destruidas por la guerra.

La siguiente fecha destacable en el desarrollo del ferrocarril en España es 1975, cuando se apaga la última locomotora a vapor. A partir de este día todos los trenes funcionarán por tracción diésel o eléctrica, siendo esta última la tecnología prioritaria en líneas con la alta densidad de tráfico, por su baja contaminación y mayor rendimiento.

En el año 1992 se inaugura en España la primera línea de Alta Velocidad, que une Madrid con Sevilla, con motivo de la celebración de la Exposición Universal, Expo 92. [3] Ese mismo año, se produjo una reordenación de la infraestructura ferroviaria que circulaba por distintas zonas de la ciudad de Barcelona con motivo de la celebración de los Juegos Olímpicos de 1992.

En 1998 fue fundada la empresa Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF), una entidad pública empresarial que se creó para la construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa diseñada para la circulación de trenes que alcanzaban velocidades de 350 km/h. En 2003 se inaugura el tramo Madrid-Lérida, siendo la segunda línea de alta velocidad en España junto con Madrid-Sevilla y la primera del siglo XXI.

La aprobación en octubre de 2003 de la nueva "Ley del Sector Ferroviario" es el último eslabón en el cambio del ferrocarril español, y europeo, hacia la liberalización del mercado ferroviario. La ley de 2003 supone la implantación de un nuevo modelo organizativo para el ferrocarril en España en el que se separan en dos empresas los servicios de operaciones de trenes y los de mantenimiento de la infraestructura, finalizando con el monopolio ejercido por RENFE. De su aplicación surgen dos nuevas empresas públicas, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y Renfe Operadora, abriendo la puerta a empresas privadas a la prestación de servicios de transporte. [4]

2.2. TRACCIÓN ELÉCTRICA FERROVIARIA

La Real Academia de la Lengua Española define el término tracción como la "*acción y efecto de tirar de algo para moverlo o arrastrarlo, y especialmente los carruajes sobre la vía*". [5] En el caso de la tracción eléctrica, el movimiento de las cargas se consigue mediante el uso de electricidad. Se puede decir, por tanto, que el objetivo de la tracción eléctrica es el transporte, de la forma más segura y fiable posible, de personas y mercancías usando líneas de ferrocarril electrificadas.

El sistema de alimentación en tracción eléctrica es similar al de los consumidores desde la red pero con la principal diferencia de que, para el primer caso, el consumidor está en movimiento.

El sistema de alimentación se compone de la subestación generadora, la red de transporte, la subestación de tracción y los sistemas de captación de corriente por parte del vehículo en movimiento. Esta captación se hace desde una línea aérea de contacto a través de un dispositivo llamado pantógrafo como se observa en la Figura 1:



Figura 1. Pantógrafo en contacto con la catenaria [6]

2.2.1. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN TRACCIÓN ELÉCTRICA

A continuación se realiza una breve descripción de cada una de las partes del sistema de alimentación en tracción eléctrica:

- **Sistemas de generación:** conjunto de las centrales de generación de energía eléctrica. En el caso de España, el sistema eléctrico ferroviario se alimenta desde el sistema eléctrico general.
- **Líneas de transporte en Alta Tensión:** transportan la electricidad desde los puntos de generación hasta las subestaciones de tracción. El sistema ferroviario puede considerarse como un consumidor móvil que demanda elevadas potencias. Por ello, para satisfacer su demanda, se precisan líneas de Alta Tensión.

En la mayoría de los casos, estos dos primeros elementos pertenecen a la Compañía Eléctrica y la subestación de tracción, que se nombra a continuación, al administrador de las infraestructuras ferroviarias.

- **Subestaciones de tracción:** conectan la red trifásica con las líneas de transporte. Dependiendo del tipo de corriente utilizada en la alimentación se distingue entre dos grandes grupos:

- a) subestación de tracción en corriente continua
- b) subestación de tracción en corriente alterna

La distinción entre ambas así como las ventajas o inconvenientes de su uso se analizará en apartados posteriores.

- Sistemas de distribución de energía a las cargas móviles: transmiten la potencia a las cargas móviles desde la línea aérea a través del pantógrafo y están formados por el conjunto de la catenaria.
- Componentes del material rodante: principalmente motores eléctricos de tracción y pantógrafos.

En un sistema de electrificación ferroviario pueden considerarse los elementos fundamentales siguientes:

- Fuentes de energía o centrales de generación de energía eléctrica.
- Líneas eléctricas de transporte en alta tensión.
- Subestaciones de tracción eléctrica, tanto para sistemas de corriente alterna como continua.
- Línea Aérea de Contacto (catenaria) y sus sistemas o elementos asociados.
- Feeders o cables de alimentación entre la subestación de tracción y la línea aérea de contacto y circuito de retorno.
- Componentes propios del material rodante motor, principalmente pantógrafos y motores eléctricos de tracción.

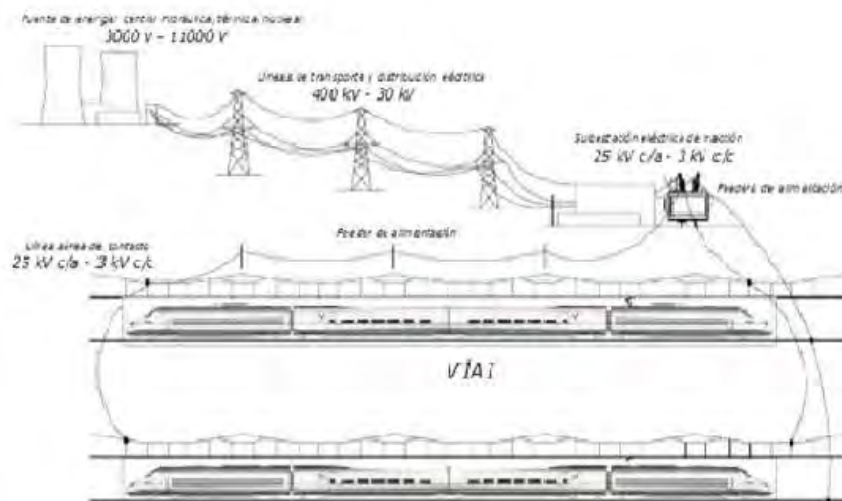


Figura 2. Sistema general de electrificación ferroviaria [7]

En el esquema de la Figura 2 se representa la disposición de los elementos, anteriormente mencionados, del sistema eléctrico ferroviario, así como los valores más frecuentes de las tensiones nominales que se dan en la tracción eléctrica en España, tanto en corriente continua como en alterna:

2.2.2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

Dentro del sistema de distribución de energía a las cargas móviles hay diferentes elementos, son los conductores del circuito de tracción:

- Hilo de contacto o línea aérea de contacto: comúnmente conocido como catenaria. Debe su nombre a la curva que describe un cable cuando está suspendido desde la misma altura por sus extremos, sometido a su propio peso y a la acción de cargas uniformemente distribuidas. Es el conductor que suministra la energía a las unidades de tracción por medio de dispositivos de captación de corriente colocados en el techo del vehículo: pantógrafos. Los hilos de contacto suelen fabricarse de cobre aleados con un pequeño porcentaje de plata y van recubiertos de aceite para facilitar el deslizamiento del pantógrafo reduciendo la fricción. En la Figura 3 se observa un ejemplo de Línea Aérea de Contacto (LAC):



Figura 3. Vista general de la línea aérea de contacto [6]

- Sustentador: conductor diseñado para soportar el peso del hilo de contacto y mantenerlos a una altura constante mediante los elementos verticales llamados péndolas (hilos que conectan el sustentador con la línea aérea de contacto).
- Feeders de acompañamiento: son conductores colocados contiguamente al hilo de contacto y se conectan a él para aumentar su sección transversal efectiva.
- Feeders de alimentación: son los conductores que se encargan de alimentar la catenaria desde las subestaciones. El feeder positivo se añade como conductor de refuerzo para reducir la impedancia y aumentar el límite de corriente admisible por la catenaria.

Algunos de estos elementos pueden verse representados en la Figura 4:

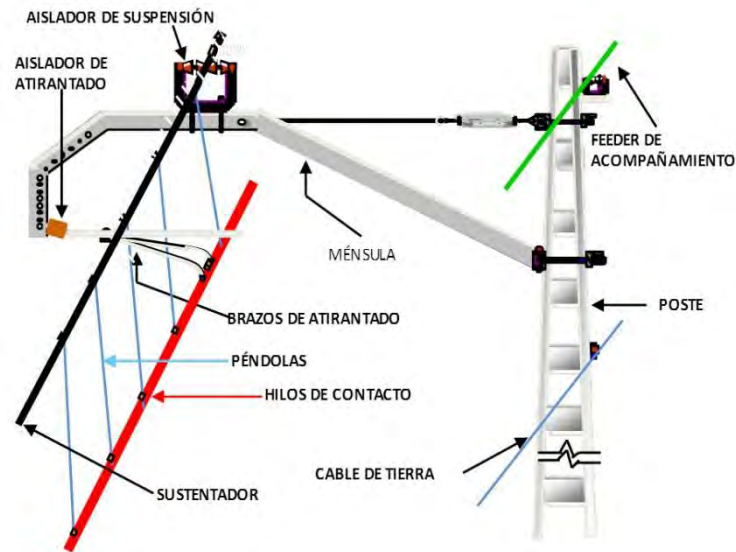


Figura 4. Distintos elementos en línea aérea de contacto [6]

2.2.3. CIRCUITO ELÉCTRICO DE TRACCIÓN FERROVIARIA

El circuito eléctrico de tracción ferroviaria se puede dividir en tres partes principales. Por un lado el circuito de alimentación o circuito aéreo positivo, formado por los conductores que se han definido en el apartado anterior (línea aérea, federes positivos y de acompañamiento).

Por otro lado el circuito negativo o de retorno, que es por donde la corriente consumida por el tren retorna a la subestación de tracción. Y por último el sistema de puestas a tierra de los distintos elementos, tales como subestaciones, postes o carriles. Este circuito eléctrico puede verse representado en la Figura 5.

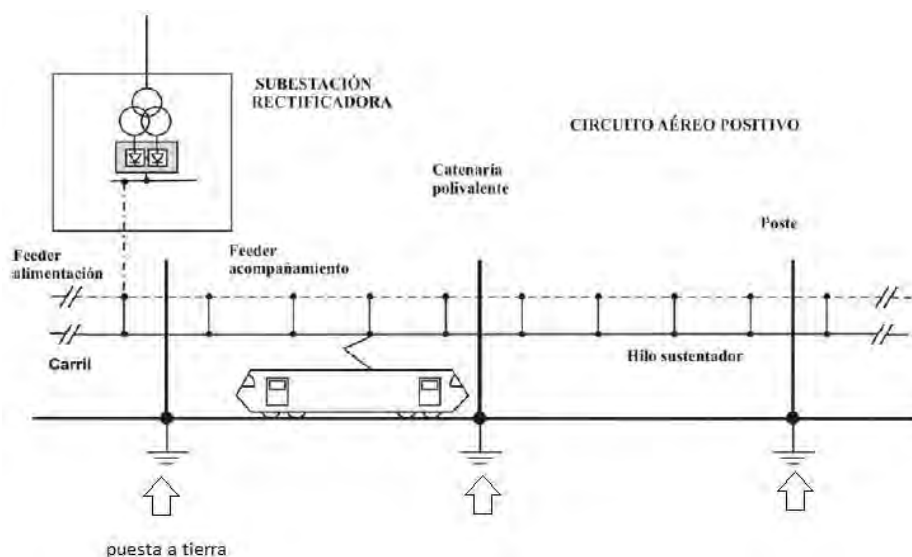


Figura 5. Circuito eléctrico de tracción ferroviaria

En los sistemas de tracción ferroviaria la corriente fluye desde la línea aérea de contacto hasta el vehículo por medio del pantógrafo, un sistema articulado que se desliza a lo largo del hilo aéreo. La corriente atraviesa los vehículos y regresa a las subestaciones a través del llamado circuito de retorno, formado principalmente por los carriles y el terreno. Como la resistencia entre estos dos elementos no es infinita, un porcentaje de la corriente circulará por el terreno, regresando a la tierra de la subestación de tracción a través de circuitos de retorno alternativos y constituyendo lo que comúnmente se conoce como "corrientes vagabundas". El principal efecto de estas corrientes es la corrosión y degradación de las infraestructuras.

La disipación de corrientes a tierra lleva asociada una distribución de diferencias de potencial entre carriles y tierra que se prolonga a lo largo del todo el trazado ferroviario. Es lo que se conoce como "tensiones accesibles", en condiciones de funcionamiento normal, y "tensiones de contacto", cuando hay un cortocircuito. Estas tensiones resultan peligrosas tanto para equipos como para personas. [7]

Los circuitos de retorno deben diseñarse intentando disminuir estos problemas de la mejor forma posible. Además, se debe tener en cuenta que los sistemas de control y señalización también utilizan el carril como elemento esencial en la transmisión de señales por lo que, si el circuito de retorno no se diseña de manera adecuada, se pueden generar interferencias electromagnéticas, además de las disipaciones de corriente y la diferencia de potencial asociada a ellas.

Además de los propios carriles se utilizan conductores adicionales para formar el circuito de retorno. Son los llamados "feeders negativos", cuyo uso permite reducir las perturbaciones de las corrientes parásitas y con ello las interferencias que se pueda provocar a las señales de los sistemas de control y señalización. El uso del feeder negativo también permite reducir la corrosión galvánica, principal consecuencia de la circulación de corrientes parásitas. Generalmente estos cables están tendidos de los postes y se conectan al carril cada cierta distancia.

2.3. SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN EN CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA

Dependiendo del tipo de corriente que circula por la catenaria se distinguen dos tipos de sistemas de electrificación ferroviaria: en corriente continua y en corriente alterna. Estos dos sistemas de alimentación tienen como consecuencia la existencia de dos tipos de subestaciones de tracción, en continua y en alterna. [7]

Dada la facilidad en el control de los motores de corriente continua, los inicios de los sistemas de electrificación ferroviaria españoles se hicieron con este tipo de corriente, a la tensión de 1.500 V. Al ir aumentando la demanda de los nuevos vehículos de tracción, se decidió aumentar esta tensión hasta los 3.000 V.

En cuanto al uso actual de cada sistema, podemos decir que ADIF cuenta con una longitud aproximada de líneas ferroviarias de 13.000 km, de los cuales 6500 km están electrificados en corriente continua y 1.237 en corriente alterna, a 25 kV y 50 Hz. [8]

A día de hoy cada vez son más los sistemas de 25 kV en alterna pues permiten satisfacer demandas de potencia mayores alcanzando velocidades más altas, de ahí que se utilicen en las líneas de Alta Velocidad.

En el caso de España, ADIF explota dos tipos de subestaciones de tracción. Por un lado las subestaciones de 3 kV en corriente continua para el ferrocarril convencional de ancho ibérico (1.668 m), y por otro lado las subestaciones de 25 kV en corriente alterna a 50 Hz, que alimentan las líneas de Alta Velocidad, con anchos de vía internacionales de 1.435 m.

La principal diferencia entre estas subestaciones en lo que a alimentación se refiere es que, las subestaciones de 3.000 V en continua se alimentan desde la red de distribución de la Compañía Suministradora mientras que las subestaciones de 25 kV y 50 Hz se alimentan directamente desde la red de transporte.

2.3.1. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA

Dentro de los sistemas de tracción alimentados en corriente continua se pueden diferenciar dos grupos: metro y tranvía por un lado y cercanías y media distancia por otro.

Para metros y tranvías, la tensión de alimentación que se utiliza normalmente es de 750 V para los primeros y 1.500 V para los últimos. En estos casos las subestaciones suelen estar separadas entre sí de 1.5 a 6 km.

En el resto de sistemas ferroviarios de corriente continua, cercanías y media distancia, las tensiones típicas son de 1.500 y 3.000 V y la distancia entre subestaciones suele estar comprendida entre los 10 y los 30 km. La separación entre las subestaciones dependerá del tráfico del tramo ferroviario en el que están colocadas y de la potencia necesaria en dicho tramo.

El objetivo o tendencia, es ir subiendo los valores de las tensiones para así reducir pérdidas y conseguir un mayor rendimiento. Pero el aumento de la tensión por encima de los 3.000 V tiene asociado un coste elevado en equipos especiales y el tener que despejar potencias de circuito muy elevadas. Esta es una de las principales razones por las que se utiliza la corriente alterna para grandes potencias.

En el caso de corriente continua, es necesario la instalación de subestaciones rectificadoras que transforman en corriente continua la tensión trifásica que les suministra la compañía. Las subestaciones rectificadoras toman la corriente alterna de las líneas de distribución y transporte y la convierten en corriente continua. Esta



corriente se hace llegar al hilo aéreo de contacto mediante los feeders y es captada por el vehículo por medio del pantógrafo.

Las potencias instaladas en las subestaciones de tracción en continua suelen ser de dos grupos rectificadores de entre 1 y 3 MW cada uno, en el caso de tranvías y metros. Para cercanías y media distancia se usan potencias de entre 3 y 6 MW.

Los transformadores rectificadores usados actualmente son de 12 pulsos. Consiguen disminuir el rizado de la tensión y con ello el nivel de armónicos. Para las instalaciones con potencias iguales o mayores a 3 MW, el grupo transformador rectificador posee un primario que se conecta a la red de Alta Tensión, y dos secundarios, uno en triángulo y otro en estrella. De esta forma se consigue un desfase de 30° entre las tensiones y una pulsación dodecafásica ($12 \times 30 = 360^\circ$).

Los rectificadores que forman estas subestaciones están formados por diodos de silicio. Son de altas prestaciones pues deben estar preparados para soportar elevadas tensiones inversas y conducir grandes corrientes.

Además a la salida de los rectificadores suelen colocarse filtros en paralelo. Estos dispositivos, formados por una bobina y un condensador en serie, anulan los armónicos que aparecen a la salida del rectificador y que podrían producir perturbaciones en los cables de comunicaciones.

Para el caso concreto de ADIF en 3.000 Vcc, la alimentación a las subestaciones de continua se realiza desde la red de distribución trifásica a tensiones entre los 15 y los 66 kV y a 50 Hz. Las subestaciones, generalmente, disponen de los siguientes elementos [8]:

- Dos llegadas de línea
- Dos grupos transformadores-rectificadores de 6.6 MVA
- 3 o 6 salidas de feeder
- Un transformador para alimentación a la línea de señales en 2.200V en corriente alterna, 50 Hz y 25 kVA
- Un transformador de servicios auxiliares: para la alimentación de otros elementos de la subestación como sistemas de control o de telecomunicación.

2.3.1.1. Sistema 1x3.000 Vcc

Es el sistema más utilizado en las líneas convencionales españolas. [9] Está formado por una línea aérea de 3.000 V. El principal inconveniente de este sistema son las altas intensidades de circulación y las caídas de tensión asociadas a ellas.

Para la mejora de estos inconvenientes hay tres posibles soluciones. Por un lado la utilización del feeder positivo y la conexión en paralelo de dos vías en los tramos de doble vía.

Cuando ninguna de estas dos soluciones es suficiente, se recurre a la instalación de subestaciones intermedias o a la disminución de las distancias entre subestaciones. Aunque esta solución depende principalmente de la disponibilidad de conexión, en el tramo en cuestión, de la compañía eléctrica.

Como se observa en la Figura 6 la catenaria se encuentra dividida en distintos tramos definidos por el seccionamiento de la línea. Son los conocidos como cantones eléctricos. Los cantones son cada uno de los tramos de una línea de ferrocarril alimentados por la misma subestación y separados eléctricamente los unos de los otros.

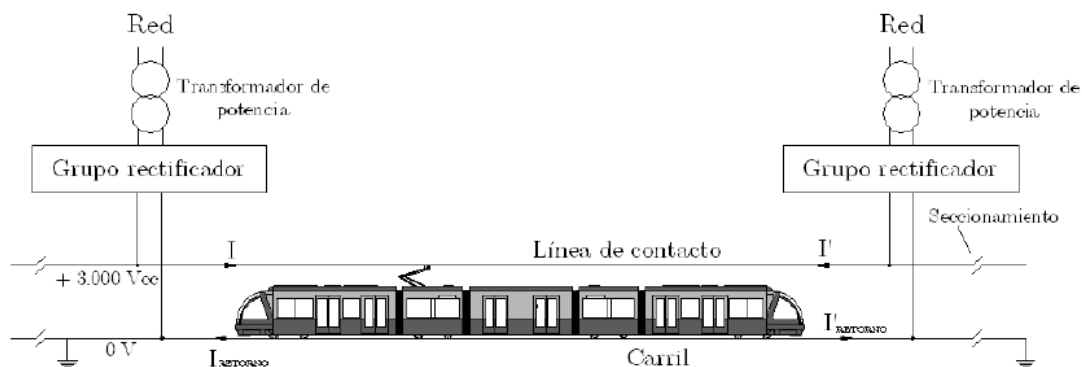


Figura 6. Sistema de electrificación 1x3000 Vcc

Cada cantón está alimentado por grupos transformadores rectificadores (formados por diodos). La alimentación de la línea es bilateral, lo que significa que el tren recibe corriente de las dos subestaciones entre las que se encuentre.

2.3.1.2. Sistema 2x3.000 Vcc

En este sistema se cuenta con dos hilos de contacto, de ahí el nombre 2x3.000 Vcc. Al trabajar con dos líneas aéreas de contacto se mejora la captación de la corriente. Además de los hilos propiamente dichos, este sistema cuenta con feeder positivo y negativo (el sistema 1x3.000 utilizaba sólo feeder positivo).

El feeder negativo se alimenta a través de grupos transformadores-rectificadores nuevos que se instalan en la subestación ya existente.

El sistema 2x3.000 Vcc incluye un convertidor continua-continua por cada tramo de línea. Con ello se consigue que una parte de la energía se alimente al doble de tensión que la de la catenaria. Esto permite reducir la corriente (se hace más baja que con el refuerzo de feeder positivo del sistema anterior). Al disminuir la corriente disminuyen también las caídas de tensión y aumenta el rendimiento de la instalación.

Este sistema nace como solución alternativa a los tramos donde la frecuencia es elevada y las soluciones convencionales son difícilmente implementables.

A pesar de las mejoras introducidas por este sistema, los sistemas de corriente continua siguen sin ser aplicables para líneas de Alta Velocidad, porque la tensión en continua no puede proporcionar la elevada potencia demandada por estas líneas. Además, para que la corriente sea de la mayor calidad posible se necesita una catenaria ligera y para proporcionar elevadas potencias en continua se necesitarían conductores de secciones enormes. Otra desventaja principal de los sistemas de continua sería el número de subestaciones necesarias que, aunque se ve reducido con el sistema 2x.000 Vcc, es mucho mayor que en corriente alterna.

Son estas las principales razones que hacen que los sistemas de electrificación ferroviaria en corriente continua se limiten al transporte en media distancia y cercanías, ya sea por metro, tranvía o ferrocarril convencional.

2.3.1.3. Comparativa entre sistemas 1x3.000 Vcc y 2x3.000 Vcc

En la Tabla 1 se muestran algunas de las ventajas e inconvenientes que muestran los dos sistemas de electrificación en corriente continua.

Tabla 1. Sistemas 1x3.000 y 2x3.000. Comparativa

| | 1x3.000 Vcc | 2x3.000 Vcc |
|-----------------------|---|--|
| VENTAJAS | <ul style="list-style-type: none"> • Un solo hilo de contacto: menor coste | <ul style="list-style-type: none"> • Se reduce la corriente y las caídas de tensión. • Mayor rendimiento |
| INCONVENIENTES | <ul style="list-style-type: none"> • Altas intensidades de circulación y las caídas de tensión asociadas | <ul style="list-style-type: none"> • 2 hilos de contacto: mayor coste • Mayor inversión en equipos |

2.3.2. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN EN CORRIENTE ALTERNA

Con el desarrollo de los sistemas de Alta Velocidad ha aumentado considerablemente la demanda de potencia de los sistemas ferroviarios. Para satisfacer estas elevadas potencias, se necesita alimentar la catenaria a la máxima tensión y reducir así la corriente. Además de la reducción de pérdidas, el uso de de alta tensión permite reducir la sección efectiva de la catenaria y aumentar la distancia entre subestaciones. Por lo tanto el número de subestaciones necesarias disminuye.

Existen tres tecnologías diferentes de alimentación en corriente alterna:

- Alimentación monofásica a 16.7 Hz y 15 kV
- Alimentación monofásica a 50 Hz y 25 kV (sistema 1x25)
- Alimentación bifásica a 50 Hz y 25 kV (sistema 2x25)

Aunque en Alemania algunas líneas se siguen alimentando a 15 kV, la alimentación más extendida en España es tanto la monofásica como la bifásica, pero siempre a 25 kV y a 50 Hz.

2.3.2.1. Sistema 1x25 kV

En este sistema las subestaciones de tracción suelen estar separadas unos 35 km. Las subestaciones disponen de dos transformadores que pueden ir conectados a distintas fases eléctricas de la red trifásica. En concreto el primario del transformador de potencia de la subestación se conecta a dos de las fases de la línea de alta tensión. Una de las salidas del secundario se conecta a la catenaria y otra al carril. La subestación se colocaría en el centro del tramo. Toda la energía necesaria para la alimentación de los trenes circula a 25 kV.

Un ejemplo de utilización de este sistema es la línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla.

Una variante del sistema 1x25 kV convencional sería el que incorpora un cable de retorno, como el que aparecen en la Figura 7. Mediante el uso de este cable, unido mecánica y eléctricamente a la vía, se consigue que la corriente de retorno se reparta en

partes iguales. [10] El 40 % de la corriente retornaría por el carril y el otro 40 % por el conductor. El 20 % restante retorna por el terreno. Con esta configuración se consigue evitar muchas de las perturbaciones electromagnéticas que el sistema 1x25 kV provoca en los sistemas de control y comunicación.

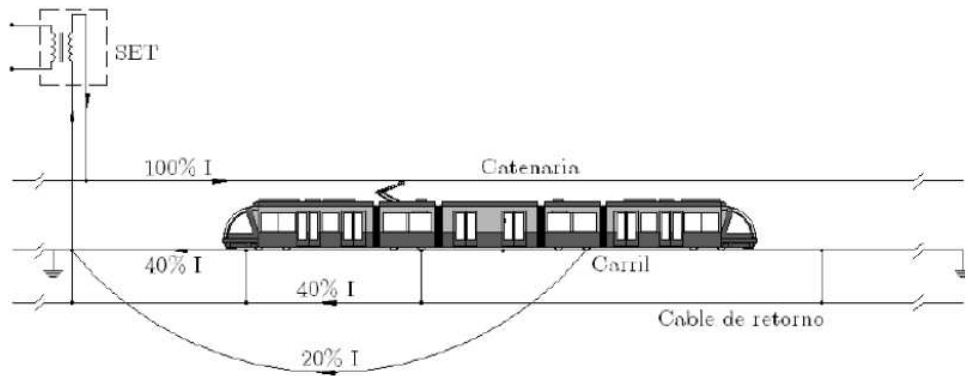


Figura 7. Sistema 1x25 kV con cable de retorno

2.3.2.2. Sistema 2x25 kV

Es un sistema de alimentación bifásica en corriente alterna, a 50 Hz.

Un ejemplo es la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona. En esta línea la alimentación de las unidades de tracción se realiza a través de [6]:

- La catenaria (+25 kV)
- La línea de retorno puesta a tierra
- Un feeder negativo (-25 kV)

En el sistema 2x25 kV se utiliza un transformador de 50 kV con una toma central y se conecta un extremo a la catenaria (+25 kV) y el otro extremo al feeder negativo. El punto central se conecta al carril. La Figura 8 presenta un esquema de conexión en este sistema:

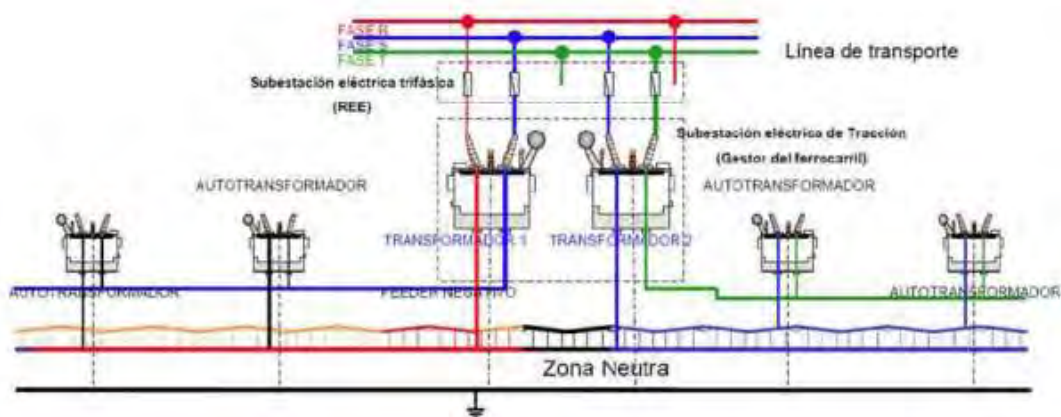


Figura 8. Conexión de los transformadores en el sistema 2x25 kV

En estos sistemas es necesaria la conexión de centros de autotransformación, cuya función es redistribuir las corrientes de retorno que entran por la toma media de los autotransformadores hacia el feeder negativo, que se convierte en cable de retorno de la corriente. La Figura 9 muestra un esquema de conexión con autotransformadores:

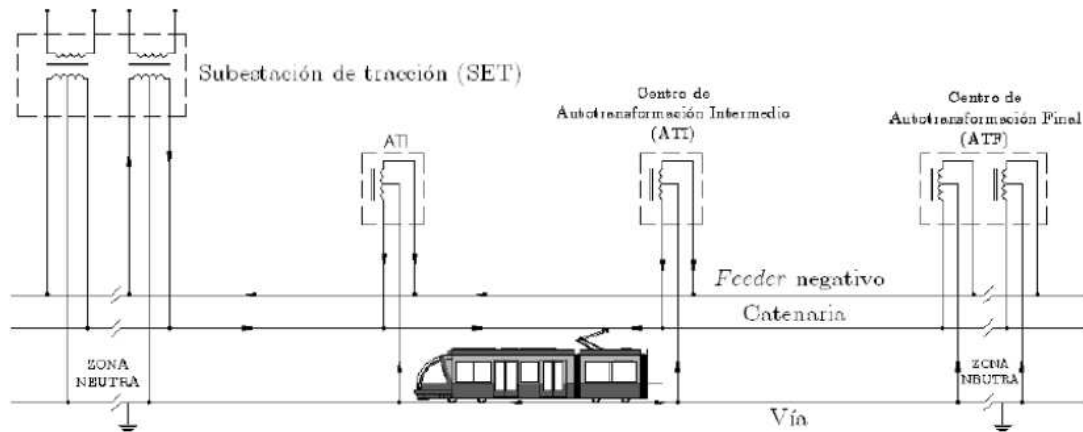


Figura 9. Sistema de alimentación 2x25 kV con autotransformadores

La energía que circula entre dos autotransformadores se conduce a 25 kV y la energía de los trenes situados fuera del módulo de autotransformación se conduce a 50 kV. Esto reduce la corriente a la mitad y con ella la caída de tensión. Por el feeder negativo circulará una corriente igual y contraria a la que va por la catenaria, en los tramos exteriores al módulo donde se encuentra el tren, por lo que los efectos de la inducción de corriente por la catenaria se contrarrestan con los de las corrientes inducidas por el feeder negativo.

Como ya se ha mencionado, la principal ventaja de este sistema de alimentación en corriente alterna es que permite reducir las corrientes para el mismo volumen de tráfico. Mediante la reducción de corriente se reducen las caídas de tensión y se puede aumentar la distancia entre subestaciones.

Con un correcto diseño del circuito de tracción se pueden optimizar las posibles perturbaciones electromagnéticas que pudieran afectar a los sistemas de control.

2.3.2.3. Comparativa entre sistemas 1x25 y 2x25

En la Tabla 2 se compara, a modo de resumen, los dos sistemas de alimentación en corriente alterna anteriormente explicados.

Tabla 2. Sistemas 1x25 y 2x25 kV. Comparativa.

| | SISTEMA 1x25 kV | SISTEMA 2x25 kV |
|---|---|--|
| Potencia instalada | 2x30 MVA (normalmente) | 2x60 MVA (normalmente) |
| Distancia entre subestaciones | Cada 35 km aprox. | Mayor distancia entre subestaciones al reducir la corriente y las caídas de tensión. Cada 60-80 km |
| Perturbaciones inducidas por campos magnéticos | Algo elevadas aunque se reducen con el uso del conductor de retorno | Limitadas a tramos entre autotransformadores entre los que esté el tren, por lo general reducidas |
| Comparación económica | Mayor número de subestaciones implica un coste mayor | Se necesita una mayor inversión a la que hay que sumar el coste de los autotransformadores. Pero menor número de subestaciones |
| Comparación medioambiental | Mayor impacto al haber más subestaciones | Menor impacto al haber menos subestaciones |
| Mantenimiento | Mayor simplicidad de la instalación implica menor mantenimiento | Instalaciones más complejas que implican mayor inversión en mantenimiento. |
| Pérdidas en Catenaria | Altas | Bajas |

2.3.3. COMPARATIVA ENTRE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Una vez analizados los distintos sistemas de electrificación en la tracción ferroviaria se pretende hacer una comparativa entre ellos para saber cuáles son las razones por las que se utiliza uno u otro en función de la aplicación. No se trata de encontrar el sistema más eficaz sino el que mejor se adapte a cada uso.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, los sistemas de electrificación en corriente alterna se usan para las líneas de Alta Velocidad por presentar las siguientes ventajas frente a los sistemas de continua:

- Mínimas pérdidas incluso en líneas de gran longitud.
- Facilidad en la producción y en la modificación de sus tensiones sin disminuir el rendimiento. [7]
- Se necesita una catenaria de sección menor y por lo tanto más ligera.



- Se puede aumentar la distancia entre subestaciones disminuyendo los costes y el impacto medioambiental. Además son subestaciones más simples (no se precisa de etapa rectificadora)
- Los problemas por corrosión son mínimos.

Todo lo contrario les ocurre a los sistemas de electrificación en corriente continua, pues son descartados en las líneas de Alta Velocidad por presentar los siguientes inconvenientes:

- El reducido nivel de voltaje en corriente continua implica un aumento de la corriente, lo que provoca un aumento de las pérdidas de potencia en la catenaria.
- Reduciendo la distancia entre subestaciones también se reducen las pérdidas de potencia pero se incrementan los costes y el impacto medioambiental.
- El uso de feeders de acompañamiento también reduce las pérdidas de potencia al aumentar la sección efectiva del cable pero provoca una mayor inversión en cables y apoyos
- Para transportar las elevadas potencias asociadas a la Alta Velocidad se necesitarían catenarias de elevada sección, con el correspondiente coste.
- La aparición de corrientes vagabundas y los problemas de corrosión que éstas llevan asociados, provocarían una mayor inversión en mantenimiento de postes, sujeciones y demás elementos.

Sin embargo, para líneas convencionales, como tren, metro o tranvía, la corriente continua es la alternativa a elegir ya que la corriente alterna presenta los siguientes inconvenientes:

- Puede provocar fluctuaciones y huecos de tensión [7]
- Produce distorsión armónica
- Provoca desequilibrio en la red de alimentación
- Es fuente de perturbaciones y tiene un gran impacto en las líneas de comunicación por la inducción generada.

2.4. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA

En este apartado se pretenden analizar los proyectos más innovadores llevados a cabo en tracción ferroviaria para conseguir el mayor aprovechamiento energético.

2.4.1. PROYECTO FERROLINERA 3.0.

Actualmente hay abiertos distintos caminos de investigación en busca del aumento de la eficiencia energética de las instalaciones ferroviarias. Uno de estos proyectos es el Proyecto Ferrolinera de ADIF. [11]

El proyecto que ha desarrollado ADIF tiene por objetivo el aprovechamiento de la energía del tren, almacenando la energía limpia generada durante el frenado regenerativo, para la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos. La propia energía del tren se suma a la energía fotovoltaica que se recoge mediante paneles instalados en las marquesinas de los aparcamientos de algunas estaciones de tren. Los puntos de recarga de los vehículos se conectan a la red de distribución de ADIF en distintas estaciones y aparcamientos. En la Figura 10 aparece la primera Ferrolinera, instalada en la estación María Zambrano de Málaga.



Figura 10. Primera ferrolinera de ADIF en la estación María Zambrano (Málaga) [11]

Ferrolinera 3.0 ha sido el último de una serie de proyectos anteriores que han ido mejorándose.

La técnica de almacenamiento usada en este proyecto consiste en baterías ión-litio y supercondensadores, que funcionan de manera coordinada con los distintos sistemas de almacenamiento colocados en cada punto de recarga. El uso de supercondensadores permite disponer de la potencia suficiente para absorber la energía del frenado regenerativo de los trenes y satisfacer las necesidades de recarga.

2.4.2. PROYECTO METROLINERA

Además de la Ferrolinera, otro proyecto innovador es la Metrolinera, basada en el mismo sistema pero aplicada en la red de Metro. La primera ha sido instalada en febrero en el Metro de Madrid, en la estación de Sáinz de Baranda. La metrolinera, al igual que la Ferrolinera, es un punto de carga para coches eléctricos aprovechando la energía de frenado de los trenes, en este caso del Metro. Es un proyecto innovador pues permite cargar un vehículo eléctrico en unos 20 minutos, frente a las varias horas que puede llevar hacerlo en un poste de corriente alterna. [12]

En la Figura 11 puede verse una imagen de la Metrolinera de Sáinz de Baranda.



Figura 11. Metrolinera de Sainz de Baranda

El objetivo de este nuevo proyecto no es otro que la mejora de la movilidad sostenible y un "empuje" al desarrollo del vehículo eléctrico. [13]

2.4.3. SISTEMA INGEBER

Hasta ahora, la devolución de energía a la red procedente del proceso de frenado de los trenes sólo podía darse en los sistemas de alta velocidad que son los únicos que, como la red, operan en corriente alterna.

En los sistemas eléctricos ferroviarios de corriente continua, como son los tranvías y metros, la energía de frenado no podía ser devuelta a la red y sólo podía ser aprovechada por otros trenes o disipada en resistencias y por tanto desaprovechada.

Pero el innovador proyecto del grupo Ingeteam [14] junto con Adif e Isolux Corsán, permite la recuperación de la energía de frenado de los trenes y su posterior inyección a la red trifásica general. Para ello el sistema se encarga de detectar la existencia de energía recuperable en la catenaria y convertirla en energía alterna de alta calidad. En el proceso se utiliza un equipo inversor de 2 MW que permite el paso de la energía recuperada desde el sistema eléctrico ferroviario en continua a la red trifásica general en corriente alterna.

El sistema, además de recuperar la energía, permite realizar un control de los armónicos en la red trifásica [15]. Incluso puede actuar de forma reversible y aportar energía a la catenaria en los picos de potencia demandada, con un consumo de corriente de calidad para la red alterna.

Mediante este sistema, se ha desarrollado el primer prototipo español de subestación eléctrica de corriente continua reversible. El proyecto está ubicado en la subestación de tracción eléctrica de La Comba (Málaga) y en su primer año de funcionamiento ha recuperado aproximadamente 1.000.000 KWh de la energía generada durante el proceso de frenado de los trenes. En condiciones normales, esta energía se habría disipado en las resistencias de freno reostático. [14] El esquema de funcionamiento de este sistema se muestra en la Figura 12:

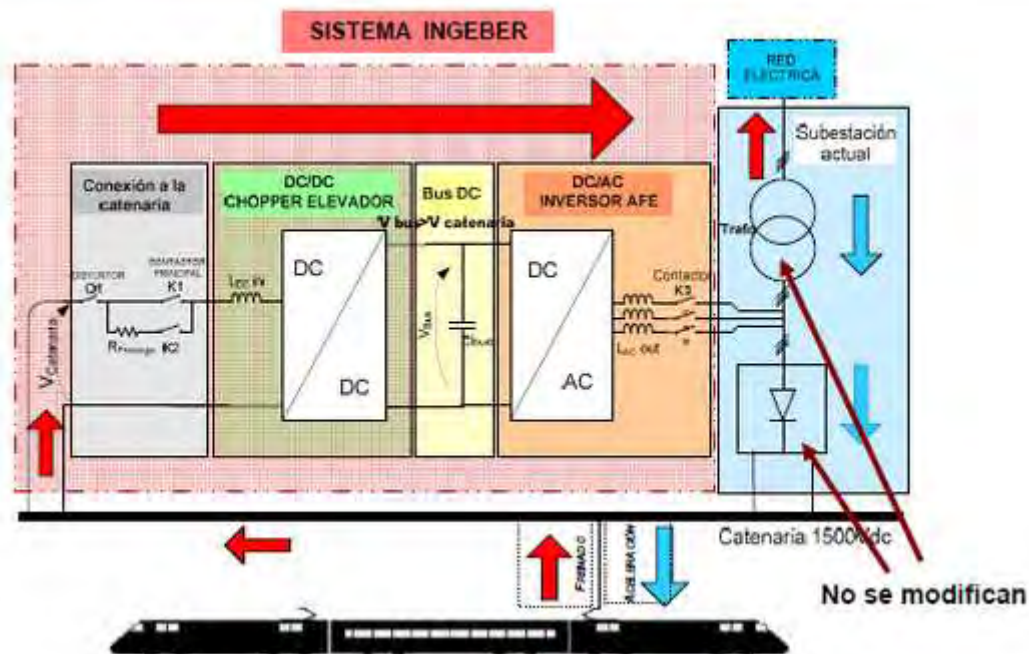


Figura 12. Esquema de funcionamiento del sistema INGEER [15]

Las principales ventajas de este sistema son la mejora de la eficiencia energética del sistema ferroviario y la reducción de emisiones de efecto invernadero.

Además la incorporación del sistema no modifica las instalaciones que actualmente pueda tener la subestación, ya que se aprovechan elementos de alto coste como el transformador.

En cuanto a seguridad, cabe destacar que, en caso de cortocircuito en la catenaria, el dispositivo de recuperación de energía no se vería afectado.

2.4.4. ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN VOLANTES DE INERCIA.

Las directrices seguidas en el ahorro energético ferroviario se han basado en la recuperación de la energía de frenado. [16]. El frenado eléctrico de los trenes puede ser de dos tipos: frenado reostático y frenado por recuperación.

El frenado reostático es el que se realiza por medio de las resistencias incorporadas en el propio tren y el frenado por recuperación es el que permite inyectar energía a la red eléctrica a través de la catenaria y ser utilizada de nuevo por otros vehículos del entorno.

El problema principal de este sistema es qué ocurre cuando no hay vehículos cercanos que puedan aprovechar la energía de frenado que han devuelto otros vehículos a la catenaria. Una buena solución a este problema sería la programación de los horarios de distintos trenes para que el frenado de unos pueda ser aprovechado en el arranque de otros. Pero a la hora de la práctica, cualquier retraso, por pequeño que sea, puede modificar el circuito eléctrico.

Una solución eficaz, que está desarrollándose actualmente, es el almacenamiento de la energía. Las dos técnicas de almacenamiento empleadas en el sector ferroviario son: baterías de supercondensadores [16] y volantes de inercia.

En algunas aplicaciones, el uso de supercondensadores presenta dificultades en cuanto a tamaños y precios. En cuanto a los volantes de inercia, su principal ventaja es que tienen energías y potencias específicas altas y se prevé que su precio de comercialización disminuya en un futuro próximo.

El volante de inercia es una batería mecánica, formada por una masa que rota sobre un eje. En el volante se almacena energía cinética que le es proporcionada a través de un motor eléctrico, acoplado en su eje.

Durante el proceso de carga del volante, el tren está frenando y entregando energía a la catenaria. Esta energía alimenta al motor eléctrico y eleva la velocidad del volante hasta su valor nominal (6.500 rpm). Una vez alcanzada esta velocidad el motor deja de alimentarse y el volante espera la consigna de descarga.



Figura 13. Volante de inercia

En el proceso de descarga, el volante reduce su velocidad hasta un valor mínimo de diseño (900 rpm aproximadamente). Durante este proceso la máquina eléctrica funciona como generador y devuelve la energía a la catenaria.

ADIF está desarrollando proyectos de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia como método de aprovechamiento de energía y también como impulso del vehículo eléctrico pues, la energía devuelta en la descarga del volante, se entrega en puntos de recarga de estos vehículos.

2.4.5. TRANVÍAS SIN CATENARIA

Otra de las innovaciones en tracción ferroviaria son los denominados "tranvías sin catenaria". Se trata de tranvías que no se alimentan durante todo el trayecto, pudiendo prescindir de la catenaria en algunos tramos. Esta medida facilita la circulación de los tranvías en las zonas centro de ciudades como Zaragoza o Sevilla, donde ya no es necesario desmontar la catenaria cada vez que haya una procesión. [17]

Este proyecto, que ha sido desarrollado por CAF (Compañía Auxiliar de Ferrocarriles) en colaboración con el Instituto Tecnológico de Aragón, está basado en la tecnología ACR (Acumulador de Carga Rápida) [16] que utiliza ultracondensadores. Las baterías de ultracondensadores se cargan en las paradas, tardando medio minuto aproximadamente, y dotan al tranvía de la energía suficiente sin que sea necesaria ninguna alimentación suplementaria. Además, la energía producida durante el frenado se recupera y también puede ser utilizada.

Con este sistema, la energía del frenado es aprovechada al máximo, a diferencia de en los tranvías convencionales donde sólo se recupera si otro vehículo cercano pudiera utilizarla. De esta forma se reducen los costes energéticos y se dota al tranvía de autonomía ante situaciones de emergencia por cortes en la alimentación, en los tramos en los que circule con catenaria. [18] En la Figura 14 puede verse un ejemplo de un tranvía sin catenaria circulando en Zaragoza.



Figura 14. Tranvía sin catenaria en Zaragoza [19]

Capítulo 3

DIMENSIONADO ELÉCTRICO

3.1. DATOS DE PARTIDA

En el presente Trabajo Fin de Grado se pretende reforzar la instalación de una subestación eléctrica de tracción en corriente continua como consecuencia de un proceso de rehabilitación y modernización de la misma, ajustándose a las nuevas exigencias de alimentación ferroviaria. Para ello se aumentará la potencia instalada sustituyendo los tres grupos transformadores-rectificadores de 3.300 kVA habituales por dos de 6.600 kVA cada uno.

En condiciones normales, trabajan ambos grupos. Las sobrecargas previstas son las habituales en entornos ferroviarios, es decir, el 150 % durante 2 horas cada 6 horas y el 300 % durante 5 minutos cada 24 horas.

Los datos de partida para los cálculos posteriores se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Datos de partida

| | | | |
|--|---|-----|----------------------|
| COMPAÑÍA | TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN | | 45 ± 5 % [kV] |
| | POTENCIA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICA | | 1.115 [MVA] |
| | PUNTO DE CONEXIÓN | | Barras S/E |
| | CONEXIÓN NEUTRO | | Rígido a tierra |
| TRANSFORMADORES DE POTENCIA | POTENCIA (S_N) | | 6.600 [kVA] |
| | NÚMERO | | 2 |
| | TENSIÓN SECUNDARIA | | 1.3 ± 5% [kV] |
| | TENSIONES RELATIVAS DE CORTOCIRCUITO (REFERIDAS AL 50% DE S_N) | 1-2 | 10 % |
| | | 1-3 | 10% |
| TRANSFORMADOR DE SERVICIOS AUXILIARES | 2-3 | | 30% |
| | POTENCIA | | 160 [kVA] |
| | TENSIÓN RELATIVA DE CORTOCIRCUITO | | 4% |

3.2.1. INTENSIDADES NOMINALES

En los siguientes apartados se introducen las expresiones necesarias para el cálculo de las corrientes nominales en los lados de alta y baja tensión, tanto para los grupos

transformadores-rectificadores (que tendrán las mismas corrientes) como para el transformador de servicios auxiliares.

3.2.1.1. Intensidades nominales en el primario

Para el caso de estudio, se calcularán las corrientes en los grupos transformadores-rectificadores 1 y 2 (de 6.600 kVA) y para el transformador de servicios auxiliares (de 160 kVA).

Para el cálculo de la intensidad en el primario del transformador trifásico se utiliza la siguiente expresión:

$$I_{\text{primario}} = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{primario}}} \quad (1)$$

Siendo:

S_{trafo} : Potencia del transformador trifásico en kVA

U_{primario} : Tensión primaria (o del lado de A.T.) de la red en kV

I_{primario} : Intensidad nominal del primario (o del lado de A.T.) en A

Al tratarse de una tensión nominal primaria de $45 \pm 5\%$ kV se distinguirá entre tres valores de corriente, máximo, mínimo y medio, que se calcularán con las siguientes expresiones:

$$I_{p1 \text{ máx}} = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{primario}} - 5\%)} \quad (2)$$

$$I_{p1 \text{ med}} = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{primario}}} \quad (3)$$

$$I_{p1 \text{ mín}} = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{primario}} + 5\%)} \quad (4)$$

La intensidad que circula por el primario del transformador de servicios auxiliares se calcula como:

$$I_{\text{primario SS.AA.}} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{primario}}} \quad (5)$$

Siendo

$S_{\text{trafo SS.AA.}}$: Potencia del transformador de servicios auxiliares

U_{primario} : Tensión primaria (o del lado de A.T.) de la red en kV

$I_{\text{primario SS.AA.}}$: Intensidad nominal primaria del transformador SSAA en A

Para el transformador de servicios auxiliares se distinguen también tres valores de corriente según el valor de tensión en el primario: corriente máxima, media y mínima:

$$I_{p.SS.AA.m\acute{a}x} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{primario}} - 5\%)} \quad (6)$$

$$I_{p.SS.AA.med} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{primario}}} \quad (7)$$

$$I_{p.SS.AA.m\acute{i}n} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{primario}} + 5\%)} \quad (8)$$

La intensidad nominal que entra a la subestación se ramifica en tres partes: dos de ellas, iguales, hacia los transformadores-reguladores y la tercera hacia el transformador de servicios auxiliares tal como se muestra en la Figura 15:

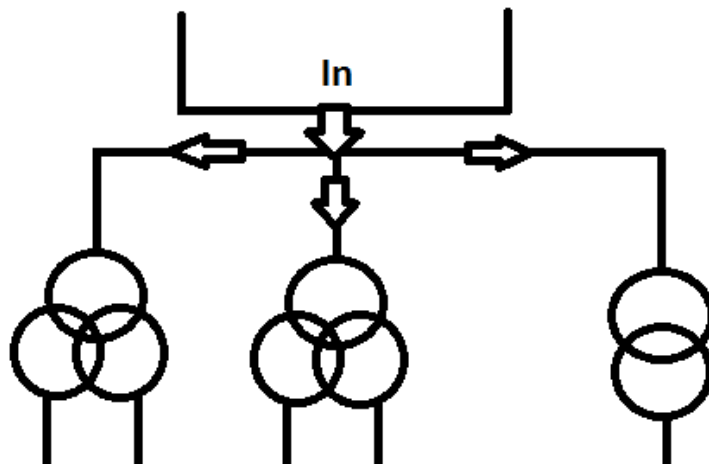


Figura 15. Ramificaciones de la corriente nominal de la subestación

Por lo tanto, según la primera Ley de Kirchhoff, la intensidad nominal de la subestación será la suma de las intensidades primarias de los tres transformadores. Como se han calculado tres valores de corriente para los dos tipos de transformadores, se calculan también tres tipos de corriente nominal en la subestación:

$$I_{subestación\ máx} = I_{p1.máx} + I_{p2.máx} + I_{p.SS.AA.máx} \quad (9)$$

$$I_{subestación\ med} = I_{p1.med} + I_{p2.med} + I_{p.SS.AA.med} \quad (10)$$

$$I_{subestación\ med} = I_{p1.med} + I_{p2.med} + I_{p.SS.AA.med} \quad (11)$$

3.2.1.2. Intensidades nominales en el secundario

La expresión que permite calcular la intensidad por el secundario de un transformador trifásico con dos devanados en el secundario es la siguiente:

$$I_{secundario} = \frac{S_{trafo}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{secundario}} \quad (12)$$

Siendo:

S_{trafo} Potencia del transformador trifásico en kVA

$U_{secundario}$: Tensión secundaria (o del lado de B.T.) en kV

$I_{secundario}$: Intensidad nominal del secundario (o del lado de B.T.) en A

Al ser la tensión nominal en el secundario de $1.3 \text{ kV} \pm 5\%$ se distinguen tres valores de corriente, máxima, media y mínima, que se calculan con las siguientes expresiones:

$$I_{s1\ máx} = \frac{S_{trafo}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot (U_{secundario} - 5\%)} \quad (13)$$

$$I_{s1\ med} = \frac{S_{trafo}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{secundario}} \quad (14)$$

$$I_{s1\ mín} = \frac{S_{trafo}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot (U_{secundario} + 5\%)} \quad (15)$$

La corriente por el secundario de los dos grupos transformadores-reguladores será la misma.

Para el caso del transformador de servicios auxiliares, la intensidad por el secundario se calcula mediante la expresión:

$$I_{\text{secundaria.SS.AA.}} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{secundario}}} \quad (16)$$

Siendo:

| | |
|-----------------------------------|--|
| $S_{\text{trafo SS.AA.}}$: | Potencia del transformador de servicios auxiliares |
| U_{primario} : | Tensión primaria (o del lado de A.T.) de la red en kV |
| $I_{\text{secundaria. SS.AA.}}$: | Intensidad nominal secundaria transformador SS.AA en A |

Se distinguen también tres valores de corriente según el valor de tensión en el secundario: corriente máxima, media y mínima.

$$I_{s.SS.AA.m\acute{a}x} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{secundario}} - 5\%)} \quad (17)$$

$$I_{s.SS.AA.med} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{secundario}}} \quad (18)$$

$$I_{s.SS.AA.m\acute{i}n} = \frac{S_{\text{trafo SS.AA.}}}{\sqrt{3} \cdot (U_{\text{secundario}} + 5\%)} \quad (19)$$

3.2.2. INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO

En la Figura 16 se muestran los puntos sobre los que se procederá a calcular las corrientes de cortocircuito: en el embarrado general de la subestación (A), en uno de los devanados del secundario de los grupos de potencia (B) y en el secundario del transformador de servicios auxiliares (C).

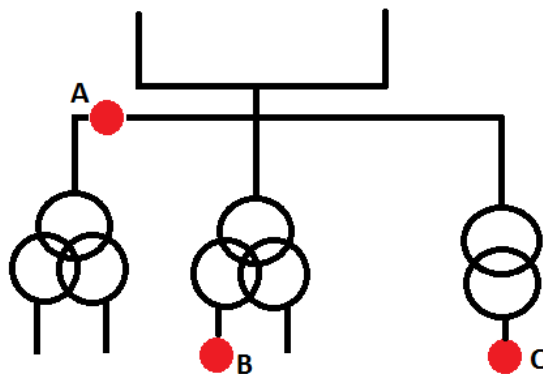


Figura 16. Puntos de cálculo de cortocircuitos

3.2.2.1. Cortocircuito en barras de 45 kV

La corriente de cortocircuito trifásico en el embarrado general de la subestación se calcula con la siguiente expresión:

$$I_{cc.p.} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_{primario}} \quad (20)$$

Siendo:

| | |
|------------------|--|
| S_{cc} : | Potencia de cortocircuito de la red trifásica |
| $U_{primario}$: | Tensión nominal del primario (A.T.) |
| $I_{cc.p.}$: | Corriente de cortocircuito en el primario (A.T.) |

La potencia de cortocircuito es la proporcionada por la Compañía Eléctrica en el punto de acometida a la subestación y es igual a 1.115 MVA.

Al trabajar con una tensión nominal en el primario de 45 kV \pm 5%, se distinguirán dos corrientes de cortocircuito, una máxima y otra mínima:

$$I_{cc.p.máx} = I_{cc.p.SS.AA.máx} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot (45kV - 5\%)} \quad (21)$$

$$I_{cc.p.mín} = I_{cc.p.SS.AA.mín} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot (45kV + 5\%)} \quad (22)$$

En el lado de Alta tensión, las corrientes de cortocircuito son las mismas para los grupos de potencia como para el transformador de servicios auxiliares.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito bifásico en el primario de los grupos de potencia se utilizará la siguiente expresión:

$$I_{cc.p.BIFÁSICO} = \frac{I_{cc.p.} \cdot \sqrt{3}}{2} \quad (23)$$

Siendo:

| | |
|-----------------------|--|
| $I_{cc.}$: | Corriente de cortocircuito bifásico en el primario de los grupos de potencia |
| $I_{cc.p.BIFÁSICO}$: | Corriente de cortocircuito bifásico en el primario de los grupos de potencia |

3.2.2.2. Cortocircuito en barras de 1,3 kV

En este apartado se calcularán las corrientes de cortocircuito en el secundario de uno de los devanados de los transformadores-reguladores y en el secundario del transformador de servicios auxiliares.

Para el grupo transformador-regulador, la corriente de cortocircuito trifásico en el secundario de uno de sus devanados se calcula como:

$$I_{cc.s.} = \frac{S_{trafo}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{cc} \cdot U_{secundario}} \quad (24)$$

Siendo:

| | |
|------------------|--|
| S_{trafo} | Potencia del transformador trifásico en kVA |
| $U_{secundario}$ | Tensión secundaria (o del lado de B.T.) en kV |
| U_{cc} | Tensión relativa de cortocircuito del transformador en % |
| $I_{cc.s.}$ | Intensidad de cortocircuito trifásico por el secundario de uno de los devanados de los grupos de potencia en A |

Se toma un 10% como valor porcentual de la tensión de cortocircuito del transformador, referido al 50% de la potencia nominal de este.

En el caso del transformador de servicios auxiliares, la corriente de cortocircuito por el secundario se calcula según la expresión:

$$I_{cc.s.SS.AA.} = \frac{S_{trafo SS.AA.}}{\sqrt{3} \cdot U_{cc.SS.AA.} \cdot U_{secundario}} \quad (25)$$

Siendo:

| | |
|------------------------|---|
| $S_{trafo SS.AA.}$ | Potencia del transformador de servicios auxiliares |
| $U_{secundario}$ | Tensión secundaria (o del lado de B.T.) de la red en kV |
| $U_{cc.SS.AA.}$ | Tensión relativa de cortocircuito del trafo de SS.AA. en % |
| $I_{cc.trif.s.SS.AA.}$ | Intensidad de cortocircuito secundario del trafo de SSAA en A |

Al igual que en el resto de cálculos se distingue entre unos valores de corriente máximos y mínimos en función de la tensión del secundario que se utilice (1,3 kV $\pm 5\%$)

Para el caso del cortocircuito bifásico en el secundario de los grupos transformadores-reguladores, la expresión que se utiliza es la siguiente:

$$I_{cc.s.BIFÁSICO} = \frac{I_{cc.p.} \cdot \sqrt{3}}{2} \quad (26)$$

Siendo:

$I_{cc.p.}$ Corriente de cortocircuito trifásico en el primario (A.T.)

$I_{cc.s.BIFÁSICO}$ Corriente de cortocircuito bifásico en el secundario de los trafos.

Dependiendo del valor de tensión secundaria usada ($1,3 \text{ kV} \pm 5\%$) se calcularán dos valores de corriente, uno máximo y otro mínimo.

3.2.2.3. Cortocircuito entre barra Ómnibus y negativo

La barra Ómnibus, también conocida como barra de continua, es el elemento de unión entre el rectificador y las distintas salidas de feeder. Por lo tanto un cortocircuito en la barra ómnibus se corresponde con el punto "A" indicado en la Figura 17.

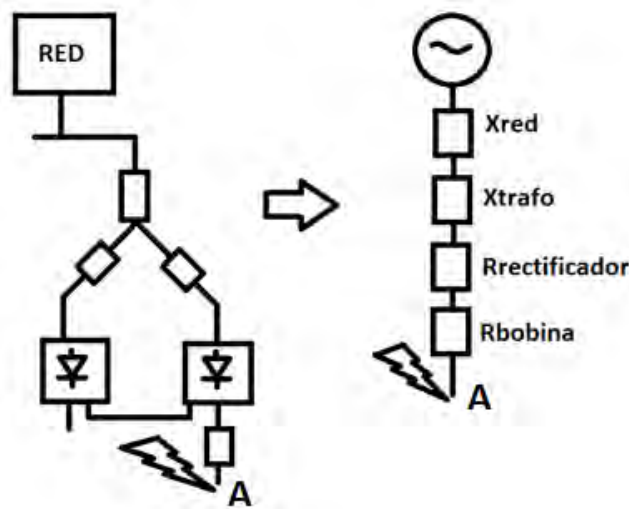


Figura 17. Cortocircuito en barra Ómnibus

En caso de producirse un cortocircuito entre la barra Ómnibus y el negativo, el despeje de este puede involucrar a los sistemas de protección de subestaciones colaterales que alimenten al mismo sector de tracción. Es lo que se conoce como "Sistema de Arrastres". Por ello, en este apartado se considerarán, además de la subestación de estudio, cuatro subestaciones colaterales separadas una cierta longitud en kilómetros tal como se indica en la Figura 18.

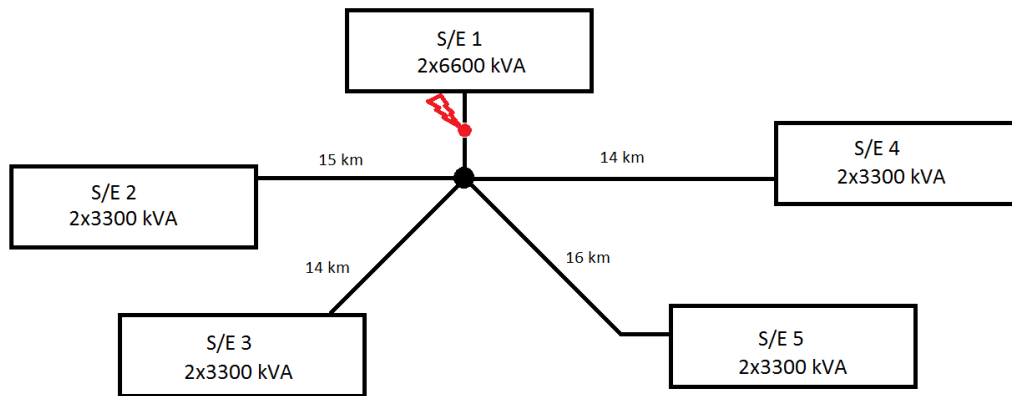


Figura 18. Sistema de arrastres

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito en este apartado se ha utilizado el esquema eléctrico que se muestra en la Figura 19:

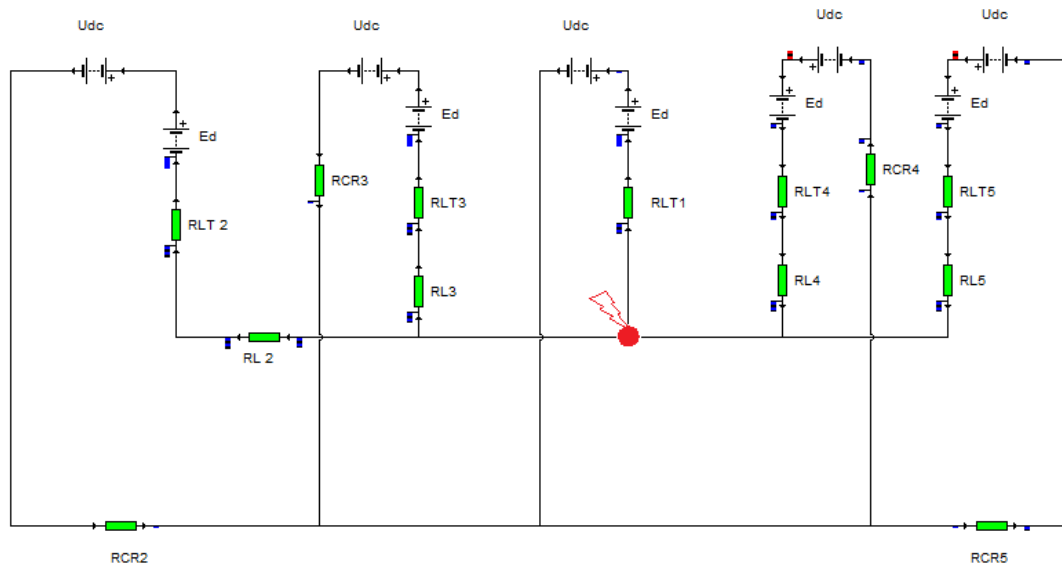


Figura 19. Esquema eléctrico para el cálculo de la corriente de cortocircuito

Siendo:

- U_{dc} : valor medio de la tensión de salida del grupo rectificador. Como el grupo rectificador en cuestión está formado por dos grupos de seis pulsos, esta tensión puede obtenerse como suma de los valores medios de las tensiones de salida de cada grupo de seis pulsos.
- E_d : caída de tensión media en el grupo rectificador.
- R_{LT} : resistencias que representan las caídas de tensión medias debidas a la elevada inductancia del transformador de potencia.
- R_L : son las resistencias de la catenaria en cada uno de los tramos que conectan las subestaciones entre sí.
- R_{CR} : resistencias de los circuitos de retorno.

En los cálculos posteriores se ha despreciado la resistencia interna de la bobina de alisamiento por ser muy reducida. La caída de tensión a la salida de un rectificador hexafásico se puede expresar como:

$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T V(t) \cdot dt \quad (27)$$

El periodo de una rectificación hexafásica es $\pi/3$ y la tensión en función del tiempo es una onda senoidal, por lo que U_{dc} puede expresarse como:

$$U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \cdot \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \cdot \text{sen}(wt) \cdot dt = \frac{3 \cdot V_m}{\pi} \quad (28)$$

Como el grupo rectificador está formado por dos grupos hexafásicos, la tensión media a la salida del grupo dodecafásico será el doble:

$$U_{dc} = \frac{2 \cdot 3 \cdot V_m}{\pi} = \frac{6 \cdot V_m}{\pi} \quad (29)$$

Siendo V_m el valor máximo de la tensión en el secundario del transformador. Al tratarse de una tensión alterna, su valor se calcula como:

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{eficaz} \quad (30)$$

Siendo V_{eficaz} la tensión del devanado secundario del transformador, 1.300 V.

Por lo tanto el valor medio de la tensión de salida de un grupo rectificador hexafásico será:

$$U_{dc} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{eficaz}}{\pi} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.300}{\pi} = 3.511,234 \text{ V} \quad (31)$$

Este valor de tensión sería el que se obtendría en el caso ideal, cuando no se produjesen caídas de tensión en los elementos que constituyen el grupo rectificador. Como se está estudiando un caso real, donde la tensión en vacío a la salida del rectificador es de 3400 V, la diferencia entre esta tensión y U_{dc} será la caída de tensión en los elementos del grupo rectificador:

$$E_d = 3.511,234 - 3.400 = 111,234 \text{ V} \quad (32)$$

Como se citó anteriormente, la caída de tensión debida a la alta inductancia del transformador se modelará mediante una resistencia R_{LT} cuyo valor puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$R_{LT} = 12 \cdot f \cdot L_T \quad (33)$$

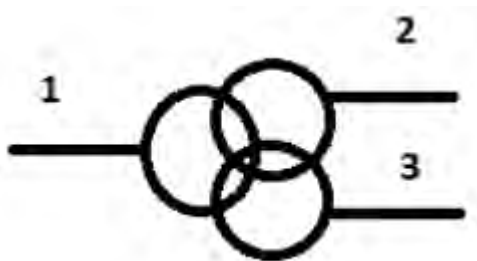
Siendo:

f : Frecuencia de trabajo de la inductancia del transformador en Hz

L_T : Coeficiente de autoinducción de la bobina en H

La frecuencia es conocida, 50 Hz, pero habrá que calcular el valor del coeficiente de autoinducción de la bobina para la subestación de estudio.

En primer lugar se necesita conocer la impedancia del devanado secundario del transformador y los datos de los que se dispone son las tensiones relativas de cortocircuito entre las distintas fases. Como ya se indicó en los datos de partida, las tensiones relativas de cortocircuito entre las fases del transformador son las mostradas en la Figura 20.



$$\begin{aligned} U_{cc1-2} &= 10 \% \\ U_{cc1-3} &= 10 \% \\ U_{cc2-3} &= 30 \% \end{aligned}$$

Figura 20. Tensiones relativas de cortocircuito

Las tensiones relativas de cortocircuito son iguales al valor de las impedancias expresadas en por unidad, luego la impedancia del secundario en por unidad será del 10%. Para obtener su valor real habrá que determinar las magnitudes de base para el secundario del transformador.

$$S_{base} = 6.600 \text{ kVA} \quad (34)$$

$$U_{base} = U_{secundario} = 1.300 \text{ V} \quad (35)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot U_{base}} = \frac{6.600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1.300} = 2.931,163 \text{ A} \quad (36)$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 0,256 \Omega \quad (37)$$

Conocida la impedancia de base se puede calcular el módulo de la impedancia de cortocircuito:

$$Z_{cc} = 0,1 \cdot 0,256 = 0,0256 \Omega \quad (38)$$

Para transformadores de alta potencia y alta tensión, como son los de la subestación de estudio, se cumple que el cociente entre X_{cc} y R_{cc} es siempre superior a 20, por lo que de manera aproximada podemos suponer que la reactancia de cortocircuito sea el 97 % de la impedancia de cortocircuito. [20]

$$X_{cc} = 0,97 \cdot Z_{cc} = 0,97 \cdot 0,0256 = 0,024832 \Omega \quad (39)$$

$$X_{cc} = L_T \cdot \omega = L_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = L_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \quad (40)$$

Por lo que el coeficiente de autoinducción buscado será:

$$L_T = \frac{X_{cc}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \frac{0,024832}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,904 \cdot 10^{-5} H = 0,079 mH \quad (41)$$

Y las caídas de tensión media en la inductancia del transformador se representarán por medio de una resistencia de valor:

$$R_{LT} = 12 \cdot f \cdot L_T = 12 \cdot 50 \cdot 7,904 \cdot 10^{-5} = 0,047424 \Omega \quad (42)$$

La subestación de estudio (S/E 1) está formada por dos grupos transformadores de 6.600 kVA colocados en paralelo, luego el valor de la R_{LT} equivalente para esta subestación será:

$$R_{LT1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{LT}} + \frac{1}{R_{LT}}} = \frac{R_{LT}}{2} = \frac{0,047424}{2} = 0,023712 \Omega \cong 0,0237 \Omega \quad (43)$$

El resto de subestaciones colaterales están formadas por dos grupos transformadores de 3.300 kVA, luego la R_{LT} para cada grupo será el doble de la calculada para los transformadores de 6.600 kVA. Al estar colocados dos transformadores en paralelo la R_{LT} equivalente será:

$$R_{LT2} = R_{LT3} = R_{LT4} = R_{LT5} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot R_{LT}} + \frac{1}{2 \cdot R_{LT}}} = R_{LT} \cong 0,0474 \Omega \quad (44)$$

El siguiente parámetro a calcular es R_L , que es la resistencia de la catenaria en los distintos tramos. Al haber 5 subestaciones se calcularán cinco resistencias de catenaria diferentes en función de la longitud de los tramos.

Como el estudio se está realizando en condiciones de cortocircuito, es conveniente estimar la resistencia de la catenaria para una temperatura superior a la ambiente.

Según el MIE-RAT 5, para conductores desnudos ya sean de cobre o aluminio, la temperatura máxima en servicio es de 80°C. Asumiendo el peor de los casos, se calcula la resistencia de la catenaria para una temperatura de 80°C mediante la siguiente expresión:

$$R = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \quad (45)$$

Siendo:

| | |
|----------|---|
| R | Resistencia de la catenaria a la temperatura T |
| R_{20} | Resistencia de la catenaria a 20 °C (temperatura ambiente). |
| α | Coefficiente de temperatura dependiente del material. |

Para el caso del Cobre, el coeficiente térmico es:

$$\alpha_{Cu} = 0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (46)$$

Para poder calcular la resistencia a 80 °C se necesitará calcular la resistencia a la temperatura ambiente de 20 °C por medio de la definición de resistencia:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (47)$$

Siendo:

| | |
|--------|---|
| ρ | Resistividad del conductor en $\Omega \cdot \text{m}$ |
| l | Longitud del conductor en m |
| S | Sección del conductor en m^2 |

La resistividad del cobre es de $1,71 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Se tomará una longitud de 1.000 m para calcular los valores de las resistencias en Ω/km .

La sección del conductor será la utilizada por ADIF en el "MODELO DE CATENARIA CA-160" [21], que es uno de los dos modelos más utilizados en las redes convencionales, y que toma un valor de 107 mm^2 .

Por lo tanto la resistencia de la catenaria a una temperatura de 20°C es:

$$R_{20} = 0,0171 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{1.000 \text{ m}}{107 \text{ mm}^2} = 0,16 \Omega/\text{km} \quad (48)$$

Luego la resistencia de la catenaria a la temperatura máxima de 80°C será:

$$R_{80} = 0,16[1 + 0,00393(80 - 20)] \cong 0,198 \Omega/\text{km} \quad (49)$$

Este valor sería el correspondiente a un solo hilo de contacto pero, el "Modelo de Catenaria CA-160" de ADIF está formado por dos hilos de contacto y un sustentador, por lo que habrá que calcular la resistencia equivalente del conjunto de la catenaria.

La resistencia de los dos hilos de contacto en paralelo será:

$$R_{\text{equivalente hilos}} = \frac{R_{80}}{2} = \frac{0,198}{2} = 0,099 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (50)$$

Los sustentadores utilizados por ADIF para las catenarias CA-160 presentan una sección de 150 mm^2 y también son de cobre, por lo que la resistencia del sustentador a la temperatura ambiente se calcula como:

$$R_{\text{sustentador } 20} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,0171 \cdot \frac{1.000}{150} = 0,114 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (51)$$

Y a la temperatura máxima de 80°C presenta una resistencia de:

$$R_{\text{sustentador}} = 0,114[1 + 0,00393(80 - 20)] = 0,141 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (52)$$

Por lo tanto la resistencia del conjunto de la catenaria será la resultante de asociar en paralelo la resistencia de los dos hilos más la del sustentador:

$$R_{\text{total catenaria}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{equivalente hilos}}} + \frac{1}{R_{\text{sustentador}}}} \cong 0,0581 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (53)$$

Las resistencias R_L de cada tramo se obtienen multiplicando la resistencia total de la catenaria por la longitud de cada tramo, con lo que se tiene:

$$R_{L2} = R_{total\ catenaria} \cdot L_2 = 0,0581 \frac{\Omega}{km} \cdot 15\ km = 0,8715\ \Omega \quad (54)$$

$$R_{L3} = R_{total\ catenaria} \cdot L_3 = 0,0581 \frac{\Omega}{km} \cdot 14\ km = 0,8134\ \Omega \quad (55)$$

$$R_{L4} = R_{total\ catenaria} \cdot L_4 = 0,0581 \frac{\Omega}{km} \cdot 14\ km = 0,8134\ \Omega \quad (56)$$

$$R_{L5} = R_{total\ catenaria} \cdot L_5 = 0,0581 \frac{\Omega}{km} \cdot 16\ km = 0,9296\ \Omega \quad (57)$$

Los últimos parámetros que quedan por calcular son las resistencias del circuito de retorno. A modo de simplificación, se considerará al carril como único conductor de retorno ya que los feeders negativos sólo se conectan al carril cada cierta distancia. En este caso el carril utilizado es el UIC 54 que posee una masa de 54,77 kg/m. La resistencia equivalente para el conjunto de los dos carriles se ha considerado de 0,05 Ω/km [21], por lo que las resistencias de retorno para cada tramo serán:

$$R_{CR2} = L_2 \cdot R_{Carril} = 15\ km \cdot 0,05 \frac{\Omega}{km} = 0,75\ \Omega \quad (58)$$

$$R_{CR3} = L_3 \cdot R_{Carril} = 14\ km \cdot 0,05 \frac{\Omega}{km} = 0,7\ \Omega \quad (59)$$

$$R_{CR4} = L_4 \cdot R_{Carril} = 14\ km \cdot 0,05 \frac{\Omega}{km} = 0,7\ \Omega \quad (60)$$

$$R_{CR5} = L_5 \cdot R_{Carril} = 16\ km \cdot 0,05 \frac{\Omega}{km} = 0,8\ \Omega \quad (61)$$

En la Tabla 4 se muestran todos los parámetros obtenidos.

Tabla 4. Parámetros para el cálculo del corto en barra Ómnibus

| PARÁMETRO | | VALOR |
|-----------------|------------------|------------|
| | U _{dc} | 3.511,23 V |
| | E _d | 111,234 V |
| R _{LT} | R _{LT1} | 0,0237 Ω |
| | R _{LT2} | 0,0474 Ω |
| | R _{LT3} | 0,0474 Ω |
| | R _{LT4} | 0,0474 Ω |
| | R _{LT5} | 0,0474 Ω |
| R _L | R _{L2} | 0,8715 Ω |
| | R _{L3} | 0,8134 Ω |
| | R _{L4} | 0,8134 Ω |
| | R _{L5} | 0,9296 Ω |
| R _{CR} | R _{CR2} | 0,75 Ω |
| | R _{CR3} | 0,7 Ω |
| | R _{CR4} | 0,7 Ω |
| | R _{CR5} | 0,8 Ω |

Con el correspondiente circuito equivalente que se puede observar en la Figura 21.

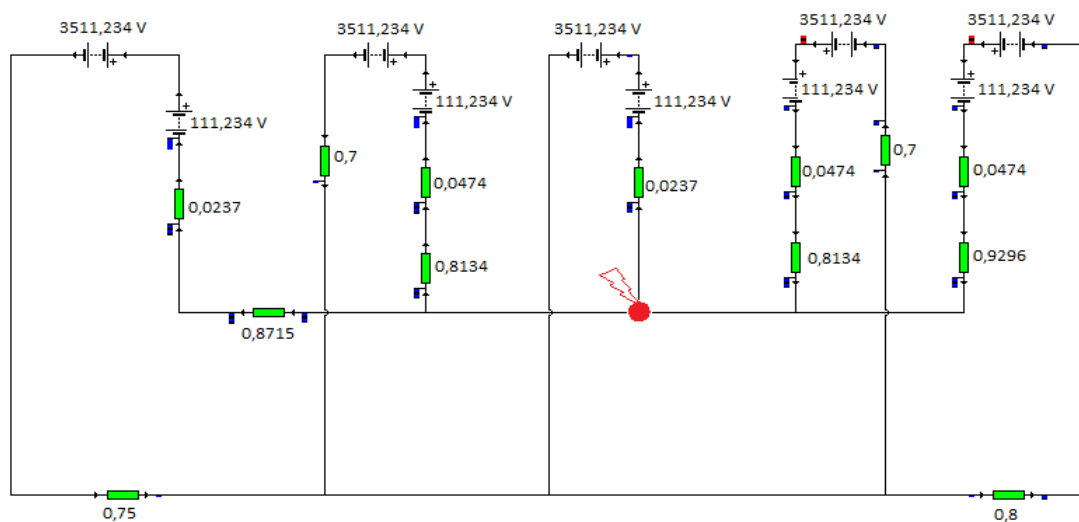


Figura 21. Circuito equivalente para el cálculo del cortocircuito en barra Ómnibus

Reduciendo el sistema mediante el equivalente Thévenin se calculará la corriente de cortocircuito correspondiente.

El primer paso consiste en cortocircuitar todas las fuentes de tensión para poder calcular la resistencia del equivalente Thévenin, tal y como se muestra en la Figura 22:

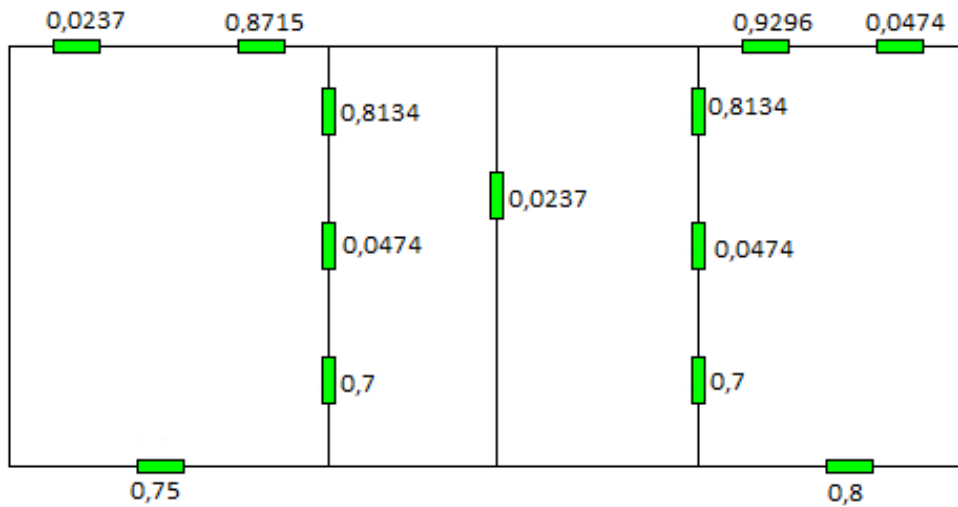


Figura 22. Fuentes cortocircuitadas

Asociando en serie las resistencias de cada rama se obtiene la simplificación de la Figura 23.

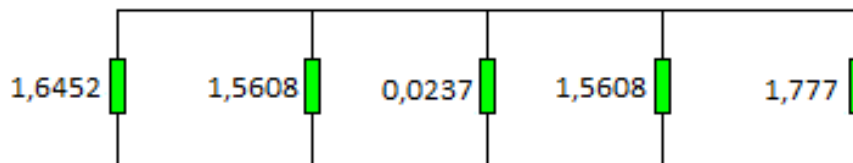


Figura 23. Simplificación del circuito

La resistencia del equivalente Thévenin será la que resulta al asociar las cinco resistencias que quedan en paralelo:

$$R_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{1,6452} + \frac{1}{1,5608} + \frac{1}{0,0237} + \frac{1}{1,5608} + \frac{1}{1,777}} = 0,4078\Omega \quad (62)$$

Por lo tanto la corriente de cortocircuito será el cociente entre la tensión de vacío y la resistencia equivalente:

$$I_{cc \text{ barra } \acute{o}mnibus} = \frac{V_0}{R_{TH}} = \frac{3400}{0,4078} = 8.336,7 \text{ A} \quad (63)$$

3.2.3. INTENSIDADES DE SOBRECARGA

Las sobrecargas previstas son del 150 % durante dos horas, cada seis horas y del 300 % durante cinco minutos cada 24 horas, partiendo de la carga nominal y sin ser acumulativo.

- Intensidades de sobrecarga en los grupos de potencia.

$$I_{sobre.150\%.primario} = 1,5 \cdot I_{p1.m\acute{a}x} \quad (64)$$

$$I_{sobre.300\%.primario} = 3 \cdot I_{p1.m\acute{i}n} \quad (65)$$

$$I_{sobre.150\%.secundario} = 1,5 \cdot I_{s1.m\acute{a}x} \quad (66)$$

$$I_{sobre.300\%.secundario} = 3 \cdot I_{s1.m\acute{i}n} \quad (67)$$

- Intensidades de sobrecarga en la subestación.

$$I_{sobre.150\%.sub} = 1,5 \cdot I_{subestaci\acute{o}n m\acute{a}x} \quad (68)$$

$$I_{sobre.300\%.sub} = 3 \cdot I_{subestaci\acute{o}n m\acute{i}n} \quad (69)$$

3.2.4. RESULTADOS

En la Tabla 5 se muestran los resultados resultantes para el cálculo de intensidades nominales y cortocircuito explicados anteriormente.

Tabla 5. Corrientes nominales, sobrecargas y cortocircuitos resultantes

| | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------|
| GRUPOS DE POTENCIA | INTENSIDADES NOMINALES | Intensidades en el primario | $I_{p1 \text{ máx}}$ | 89,134 A |
| | | | $I_{p1 \text{ med}}$ | 84,678 A |
| | | | $I_{p1 \text{ mín}}$ | 80,646 A |
| | | Intensidades en el secundario | $I_{s1 \text{ máx}}$ | 1.542,717 A |
| | | | $I_{s1 \text{ med}}$ | 1.465,581 A |
| | | | $I_{s1 \text{ mín}}$ | 1.395,792 A |
| | SOBRECARGAS | PRIMARIO | 150 % | 133,701 A |
| | | | 300 % | 241,938 A |
| | | SECUNDARIO | 150 % | 2.314,076 A |
| | | | 300 % | 4.187,376 A |
| | CORTOCIRCUITO | TRIF. PRIMARIO | mín | 13,62 kA |
| | | | máx | 15,06 kA |
| | | TRIF. SECUNDARIO | mín | 13,958 kA |
| | | | máx | 15,427 kA |
| | | BIF. PRIMARIO | mín | 11,8 kA |
| | | | max | 13 kA |
| | | BIF. SECUNDARIO | mín | 9,305 kA |
| | | | máx | 10,284 kA |
| | | OMNIBUS | | 8.336,7 A |
| SERVICIOS AUXILIARES | INTENSIDADES NOMINALES | PRIMARIO | $I_{p.SS.AA.máx}$ | 2,161 A |
| | | | $I_{p.SS.AA.med}$ | 2,053 A |
| | | | $I_{p.SS.AA.mín}$ | 1,955 A |
| | | SECUNDARIO | $I_{s.SS.AA.máx}$ | 74,798 A |
| | | | $I_{s.SS.AA.med}$ | 71,058 A |
| | | | $I_{s.SS.AA.mín}$ | 67,674 A |
| | CORTOCIRCUITO | TRIF. PRIMARIO | mín | 13,62 kA |
| | | | máx | 15,06 kA |
| | | TRIF. SECUNDARIO | mín | 1,7 kA |
| | | | máx | 1,87 kA |
| SUBESTACIÓN | INTENSIDADES NOMINALES | Máxima | | 180,429 A |
| | | Media | | 171,409 A |
| | | Mínima | | 163,247 A |
| | SOBRECARGA | 150 % | | 270,644 A |
| | | 300 % | | 489,741 A |
| | CORTOCIRCUITO | TRIF. ENTRADA | mín | 13,62 kA |
| | | | máx | 15,06 kA |

3.3. JUSTIFICACIÓN DE CABLES Y EMBARRADOS.

En este capítulo se va a comprobar la validez de los conductores propuestos ante las intensidades nominales, sobrecargas y cortocircuitos a los que puedan estar sometidos.

Para ello, se mostrarán las intensidades máximas admisibles para una temperatura ambiente determinada y el tiempo que tardan en alcanzar 90°C y 200°C en caso de cortocircuito.

A continuación se muestran las fórmulas utilizadas [36]:

- Tiempo hasta alcanzar los 90°C :

$$t = \tau \cdot \ln \left[\frac{I(A)^2 - \alpha[Ti - Tamb]}{I(A)^2 - \alpha[90 - Tamb]} \right] \quad (70)$$

Siendo:

| | |
|----------|---|
| t | Tiempo en alcanzar los 90°C en segundos |
| I | Intensidad en Amperios |
| Ti | Temperatura de estudio en °C, es igual a la ambiente en cada caso |
| Tamb | Temperatura ambiente en °C |
| α | Coeficiente de Temperatura |
| τ | Coeficiente de Tiempo |

- Tiempo hasta alcanzar los 200°C por cortocircuito:

$$t = \frac{coef.corto^2 \cdot S(mm^2)^2}{I(kA)^2} \quad (71)$$

Siendo:

| | |
|---|--|
| t | Tiempo en alcanzar los 200°C por cortocircuito en segundos |
| I | Intensidad en kA |
| S | Sección del cable en mm ² |

A partir de las tablas y gráficas, que aparecerán en los siguientes apartados, se pretende justificar la validez de los conductores ante sollicitaciones térmicas.

3.3.1. EMBARRADO GENERAL DEL PARQUE DE 45 KV (COMPAÑÍA)

La compañía eléctrica suministradora plantea que el embarrado general de 45 kV de su competencia se mantenga con un conductor tipo RAIL. Las características técnicas de este cable [37] se muestran en las Tablas 6 y 7.



Tabla 6. Datos de partida del cable RAIL

| | | |
|----------------------|-----------------|---------|
| NATURALEZA CONDUCTOR | Al-Cu-Fe | Al |
| SECCIÓN ACERO | mm ² | 483,8 |
| SECCIÓN ALUMINIO | mm ² | 33,42 |
| AI SLAMIENTO | kV | DESNUDO |
| INSTALACIÓN | | AÉREA |

Tabla 7. Ficha técnica del cable RAIL

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|---|------------------------|-------------|
| DIÁMETRO DEL CABLE | mm | 29,61 |
| COEFICIENTE DE CORTO | | 0,093 |
| CALOR ESPECÍFICO (Ce) | J/(°C·kg) | 896 |
| COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR (a) | W/(°C·m) | 11,7 |
| RESISTIVIDAD (20 °C) | μΩ·cm | 2,85 |
| DENSIDAD | kg/m ³ | 2.707 |
| RESISTENCIA ÓHMICA (20 °C) (R) | Ω/km | 0,0589 |
| MASA CONDUCTOR (M) | kg/m | 1,6 |
| SUPERFICIE POR METRO (S) | m | 0,09302 |
| $\alpha = a \cdot S/R$ | W/(°C·m ²) | 18.477,657 |
| $\tau = M \cdot Ce/a \cdot S$ | s | 1.317,24268 |

La capacidad de sobrecarga del cable se muestra en la Tabla 8 y en la Figura 24.

Tabla 8. Capacidad de sobrecarga del cable RAIL

| I (kA) | I (A) | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 90°C por sobrecarga Ticable= Tamb (seg) | | | | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 200 °C por corto |
|--------|--------|---|--------------|--------------|--------------|--|
| | | Tamb = 40 °C | Tamb= 25 °C | Tamb = 15 °C | Tamb = 0 °C | Tamb = 40 °C |
| 0,962 | 962 | 8.320,406 | | | | |
| 1,096 | 1.096 | 1.930,906762 | 11.688,08435 | | | |
| 1,178 | 1.178 | 1.443,613086 | 2.642,691382 | 8.713,513822 | | |
| 1,29 | 1.290 | 1.067,093201 | 1.685,016482 | 2.355,792764 | 9.631,546704 | |
| 2 | 2.000 | 345,9424747 | 470,3204407 | 560,2832812 | 707,9147451 | |
| 5 | 5.000 | 49,6013864 | 64,85347739 | 75,12054173 | 90,67276293 | |
| 10 | 10.000 | 12,22634521 | 15,91648787 | 18,38233864 | 22,08979149 | |
| 15 | 15.000 | 5,419925929 | 7,050261931 | 8,138274707 | 9,771980742 | |
| 20 | 20.000 | 3,04596382 | 3,961128129 | 4,571591091 | 5,487816324 | |
| 25 | 25.000 | 1,948605267 | 2,533749395 | 2,923989937 | 3,509567606 | |
| 30 | 30.000 | 1,352892214 | 1,759030981 | 2,029859743 | 2,436207321 | 2,249340048 |
| 35 | 35.000 | 0,993826184 | 1,292120313 | 1,491020599 | 1,789427353 | 1,652576362 |
| 40 | 40.000 | 0,760830889 | 0,989165875 | 1,141411191 | 1,369812163 | 1,265253777 |
| 45 | 45.000 | 0,601113891 | 0,781501562 | 0,901773735 | 1,082202588 | 0,999706688 |
| 50 | 50.000 | 0,486881141 | 0,632980583 | 0,730389214 | 0,876515668 | 0,809762417 |

Este cable soporta:

- 962 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 40°C.
- 1.096 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 25°C
- 1.178 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 15°C
- 1.290 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 0°C.

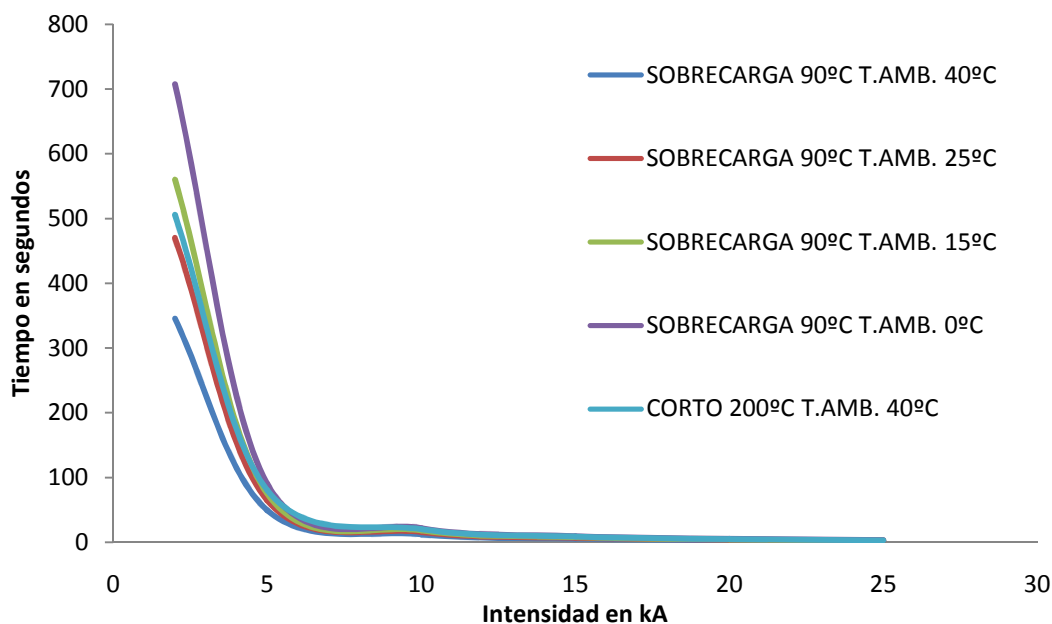


Figura 24. Gráfica de tiempo frente a corriente para el cable RAIL

De la Tabla 8 y la Figura 24 se deduce que este conductor es capaz de soportar:

- 1.096 A en régimen permanente a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 1.096 A en 2 horas a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 2 kA en 5 minutos a una temperatura ambiente de 25 °C
- 45 kA en 1 segundo a una temperatura ambiente de 40 °C

Por lo tanto, este cable es válido pues soporta las condiciones descritas en la Tabla 5.

3.3.2. EMBARRADO GENERAL DEL PARQUE DE 45 kV (ADIF)

El administrador ferroviario plantea que el embarrado general de 45 kV presente una sección de cobre de 120 mm². Esta decisión se justifica por criterios de minimización de materiales de repuesto, con la consiguiente reducción de costes de mantenimiento. Las características técnicas de este cable [37] se muestran en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Datos de partida del cable Cu 120

| | | |
|-----------------------------|-----------------|---------|
| NATURALEZA CONDUCTOR | Al-Cu-Fe | Cu |
| SECCIÓN | mm ² | 120 |
| AI SLAM IENTO | kV | DESNUDO |
| INSTALACIÓN | | AÉREA |

Tabla 10. Ficha técnica del cable Cu 120

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|---|------------------------|---------|
| DIÁMETRO DEL CABLE | mm | 12,36 |
| COEFICIENTE DE CORTO | | 0,142 |
| CALOR ESPECÍFICO (Ce) | J/(°C·kg) | 383,1 |
| COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR (a) | W/(°C·m) | 20 |
| RESISTIVIDAD (20 °C) | μΩ·cm | 1,76 |
| DENSIDAD | kg/m ³ | 8954 |
| RESISTENCIA ÓHMICA (20 °C) (R) | Ω/m | 0,1467 |
| MASA CONDUCTOR (M) | kg/m | 1,0745 |
| SUPERFICIE POR METRO (S) | M | 0,03883 |
| $\alpha = a \cdot S / R$ | W/(°C·m ²) | 5295 |
| $\tau = M \cdot Ce / a \cdot S$ | S | 530,011 |

La capacidad de sobrecarga de este cable se muestra en la Tabla 11 y en la Figura 25.

Tabla 11. Capacidad de sobrecarga del cable Cu 120

| I (kA) | I(A) | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 90°C por sobrecarga Ticable=Tamb (seg) | | | | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 200 °C por corto |
|----------|--------|--|--------------|--------------|--------------|--|
| | | Tamb= 40 °C | Tamb= 25 °C | Tamb= 15 °C | Tamb= 0 °C | Tamb= 40°C |
| 0,515 | 515 | 3.289,403456 | | | | |
| 0,587 | 587 | 774,8239303 | 3.494,46324 | | | |
| 0,631 | 631 | 579,3351012 | 1.058,353024 | 3.110,351852 | | |
| 0,691 | 691 | 428,3976776 | 675,9745769 | 943,9942004 | 3.249,235882 | |
| 0,8 | 800 | 282,8986832 | 408,9036329 | 513,3849643 | 723,153808 | |
| 0,9 | 900 | 209,7320287 | 293,1504536 | 357,0827998 | 470,273886 | |
| 1 | 1.000 | 162,9723343 | 223,5466142 | 268,1527193 | 343,0024576 | |
| 2 | 2.000 | 36,28944422 | 47,67910221 | 55,41048592 | 67,2232074 | |
| 3 | 3.000 | 15,82274824 | 20,66316602 | 23,91484376 | 28,8300711 | 32,2624 |
| 4 | 4.000 | 8,842107317 | 11,52376004 | 13,31909554 | 16,02355226 | 18,1476 |
| 5 | 5.000 | 5,641930443 | 7,346286748 | 8,485576497 | 10,19911576 | 11,614464 |
| 6 | 6.000 | 3,91162712 | 5,090766459 | 5,878319135 | 7,06184652 | 8,0656 |
| 8 | 8.000 | 2,196737241 | 2,857537638 | 3,298529344 | 3,960705591 | 4,5369 |
| 10 | 10.000 | 1,404862642 | 1,827048537 | 2,108692732 | 2,531439819 | 2,903616 |
| 15 | 15.000 | 0,623923755 | 0,811244183 | 0,936161255 | 1,123592079 | 1,290496 |
| 20 | 20.000 | 0,35086674 | 0,456172068 | 0,526387244 | 0,631727452 | 0,725904 |
| 30 | 30.000 | 0,155912101 | 0,202694675 | 0,233885352 | 0,28067481 | 0,322624 |

Este cable soporta:

- 515 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 40°C.
- 587 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 25°C
- 631 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 15°C
- 691 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 0°C

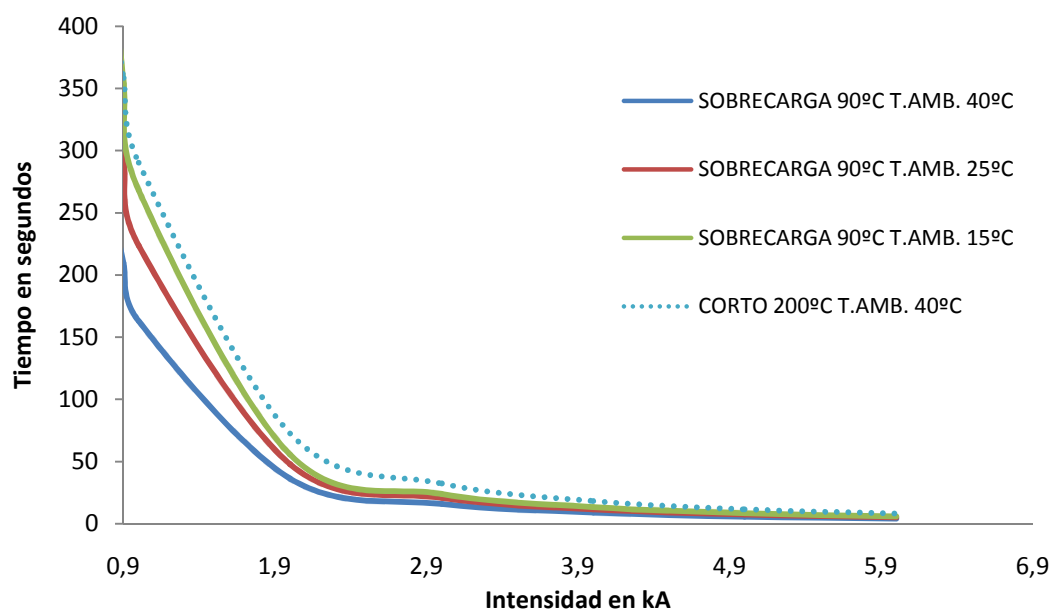


Figura 25. Gráfica de tiempo frente a corriente para el Cable Cu 120

De la Tabla 11 y la Figura 25 se deduce que este conductor es válido pues es capaz de soportar:

- 587 A en régimen permanente a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 800 A en 5 minutos a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 20 kA en 1 segundo a una temperatura ambiente de 40 °C

Por lo tanto el cable es válido pues soporta las condiciones descritas en la Tabla 5.

3.3.3. CONDUCTOR DE ENTRADA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Del mismo modo, el administrador ferroviario plantea que la alimentación al transformador de potencia esté constituida por un conductor de tubo de cobre de 36 mm de diámetro interior y 40 mm de diámetro exterior. Las características técnicas de este conductor [37] se muestran en las Tablas 12 y 13.

Tabla 12. Datos de partida del tubo 40/ 36

| | | |
|------------------------|----------|---------|
| NATURALEZA CONDUCTOR | Al-Cu-Fe | Cu |
| DIÁMETRO EXTERIOR TUBO | mm | 40 |
| DIÁMETRO INTERIOR TUBO | mm | 36 |
| SECCIÓN | | 238,76 |
| AI SLAMIENTO | | DESNUDO |
| INSTALACIÓN | | AÉREA |

Tabla 13. Ficha técnica del tubo 40/36

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|---|------------------------|--------------|
| DIÁMETRO EXTERIOR TUBO | mm ² | 40 |
| COEFICIENTE DE CORTO | | 0,142 |
| CALOR ESPECÍFICO (Ce) | J/(°C·kg) | 383,1 |
| COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR (a) | W/(°C·m) | 7,8 |
| RESISTIVIDAD (20 °C) | μΩ·cm | 1,76 |
| DENSIDAD | kg/m ³ | 8954 |
| RESISTENCIA ÓHMICA (20 °C) (R) | Ω/km | 0,0737 |
| MASA CONDUCTOR (M) | kg/m | 2,1379 |
| SUPERFICIE POR METRO (S) | m | 0,12566 |
| $\alpha = a \cdot S / R$ | W/(°C·m ²) | 13.299,15875 |
| $\tau = M \cdot Ce / a \cdot S$ | s | 835,6181822 |

La capacidad de sobrecarga de este tubo se muestra en la Tabla 14 y Figura 26.

Tabla 14. Capacidad de sobrecarga del tubo 40/36

| I (kA) | I (A) | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 90°C por sobrecarga Ticable=Tamb | | | | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 200 °C por corto |
|----------|---------|---|--------------|--------------|-------------|--|
| | | Tamb= 40 °C | Tamb= 25 °C | Tamb= 15 °C | Tamb= 0 °C | Tamb= 40 °C |
| 0,816 | 816 | 5.427,181428 | | | | |
| 0,93 | 930 | 1.223,330951 | 6.084,547497 | | | |
| 0,999 | 999 | 916,7658417 | 1.679,674998 | 6.037,881726 | | |
| 1,094 | 1.094 | 677,506191 | 1.070,132874 | 1.496,792018 | 7.797,44472 | |
| 2 | 2.000 | 151,8893429 | 203,4170242 | 239,623319 | 297,055892 | |
| 6 | 6.000 | 15,57584946 | 20,30578999 | 23,47402422 | 28,24901415 | |
| 8 | 8.000 | 8,725662019 | 11,36122828 | 13,12290216 | 15,77239668 | 17,96055924 |
| 10 | 10.000 | 5,57391662 | 7,253367966 | 8,374880444 | 10,05997663 | 11,49475791 |
| 12 | 12.000 | 3,866827182 | 5,030373404 | 5,806971992 | 6,97322489 | 7,982470773 |
| 14 | 14.000 | 2,839189003 | 3,692830316 | 4,262409404 | 5,117506681 | 5,864672405 |
| 18 | 18.000 | 1,716381037 | 2,231983603 | 2,575895485 | 3,092028857 | 3,547764788 |
| 20 | 20.000 | 1,389997227 | 1,807447688 | 2,085863904 | 2,503662247 | 2,873689478 |
| 24 | 24.000 | 0,965030477 | 1,254757088 | 1,447963987 | 1,737858126 | 1,995617693 |
| 28 | 28.000 | 0,708893342 | 0,921678673 | 1,06356567 | 1,276441351 | 1,466168101 |
| 30 | 30.000 | 0,617491097 | 0,802827444 | 0,926407851 | 1,111812738 | 1,277195324 |
| 32 | 32.000 | 0,542692497 | 0,705569001 | 0,814170978 | 0,977100414 | 1,122534953 |

Este tubo soporta:

- 816 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 40°C.
- 930 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 25°C
- 999 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 15°C
- 1.094 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 0°C

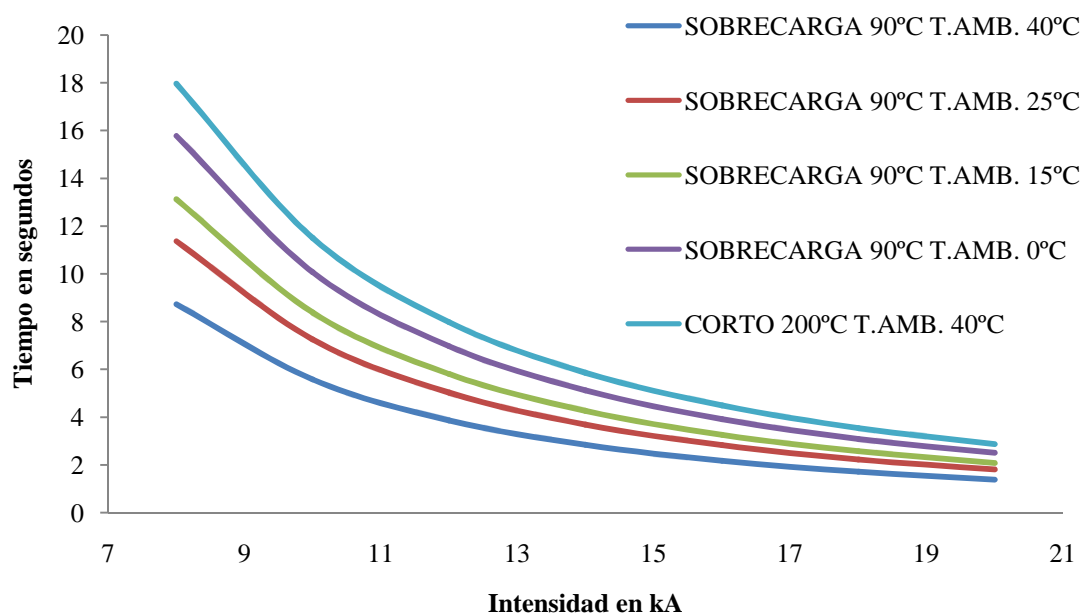


Figura 26. Gráfica de tiempo frente a corriente para el tubo 40/36

De la Tabla 14 y la Figura 26 se deduce que este conductor es capaz de soportar:

- 930 A en régimen permanente a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 2 kA en 5 minutos a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 32 kA en 1 segundo a una temperatura ambiente de 40 °C

Por lo tanto este conductor soporta las condiciones descritas en la Tabla 5.

3.3.4. PLETINA DE COBRE ENTRE TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y RECTIFICADOR

Se plantea la utilización de una pletina doble de cobre de 80x10 mm cuyas características técnicas [37] se muestran en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15. Datos de partida de la pletina 80x10

| | | |
|-----------------------------|----------|----|
| NATURALEZA CONDUCTOR | Al-Cu-Fe | Cu |
| DIMENSIÓN MAYOR | mm | 80 |
| DIMENSIÓN MENOR | mm | 10 |
| NÚMERO DE PLETINAS | | 2 |

Tabla 16. Ficha técnica de la pletina 80x10

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|---|------------------------|--------------|
| SECCIÓN TOTAL | mm ² | 1.600 |
| COEFICIENTE DE CORTO | | 0,142 |
| CALOR ESPECÍFICO (Ce) | J/(°C·kg) | 383,1 |
| COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR (a) | W/(°C·m) | 7,8 |
| RESISTIVIDAD (20 °C) | μΩ·cm | 1,76 |
| DENSIDAD | kg/m ³ | 8954 |
| RESISTENCIA ÓHMICA (20 °C) (R) | Ω/km | 0,011 |
| MASA CONDUCTOR (M) | kg/m | 14,3264 |
| SUPERFICIE POR METRO (S) | m | 0,36 |
| $\alpha = a \cdot S/R$ | W/(°C·m ²) | 255.273 |
| $\tau = M \cdot Ce/a \cdot S$ | s | 1.954,574017 |

La capacidad de sobrecarga de la pletina se muestra en la Tabla 17 y en la Figura 27

Tabla 17. Capacidad de sobrecarga de la pletina 80x10

| I (kA) | I (A) | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 90°C por sobrecarga Ticable=Tamb | | | | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 200 °C por corto |
|---------|---------|---|-------------|-------------|------------|--|
| | | Tamb= 40 °C | Tamb= 25 °C | Tamb= 15 °C | Tamb= 0 °C | |
| 3,573 | 3.573 | 16.543,604 | | | | |
| 4,074 | 4.074 | 2.864,201 | 15.947,622 | | | |
| 4,376 | 4.376 | 2.146,519 | 3.935,677 | 16.601,297 | | |
| 4,794 | 4.794 | 1.584,184 | 2.501,936 | 3.498,774 | 15.591,286 | |
| 5 | 5.000 | 1.396,472 | 2.130,053 | 2.837,372 | 4.912,004 | |
| 10 | 10.000 | 266,895 | 354,628 | 415,383 | 510,211 | |
| 12 | 12.000 | 181,410 | 239,288 | 278,847 | 339,729 | |
| 15 | 15.000 | 114,147 | 149,732 | 173,821 | 210,521 | |
| 30 | 30.000 | 27,918 | 36,372 | 42,028 | 50,543 | |
| 60 | 60.000 | 6,942 | 9,030 | 10,423 | 12,514 | |
| 100 | 100.000 | 2,496 | 3,246 | 3,746 | 4,496 | |
| 120 | 120.000 | 1,733 | 2,254 | 2,600 | 3,121 | 3,575 |
| 140 | 140.000 | 1,273 | 1,655 | 1,910 | 2,292 | 2,626 |
| 160 | 160.000 | 0,975 | 1,267 | 1,462 | 1,755 | 2,011 |
| 180 | 180.000 | 0,770 | 1,001 | 1,155 | 1,386 | 1,589 |
| 200 | 200.000 | 0,624 | 0,811 | 0,936 | 1,123 | 1,287 |
| 250 | 250.000 | 0,399 | 0,519 | 0,599 | 0,719 | 0,824 |

Esta pletina soporta:

- 3.573 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 40°C.
- 4.074 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 25°C
- 4.376 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 15°C
- 4.794 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 0°C

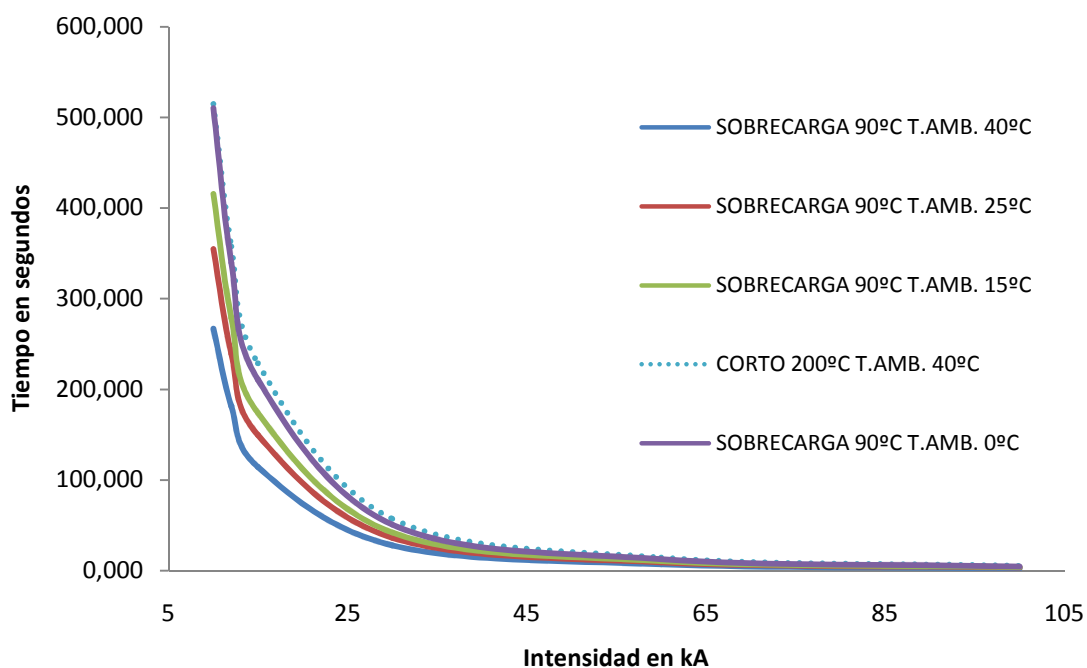


Figura 27. Gráfica de tiempo frente a corriente para la pletina 80x 10

De la Tabla 17 y la Figura 27 se deduce que este conductor es capaz de soportar:

- 4.074 A en régimen permanente a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 10 kA en 5 minutos a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 250 kA en 1 segundo a una temperatura ambiente de 40 °C

Por lo tanto este conductor soporta las condiciones descritas en la Tabla 5.

3.4.5. PLETINA DE COBRE EN BARRA ÓMNIBUS

Se plantea la utilización de una pletina doble de cobre de 100x10 mm cuyas características técnicas [37] se muestran en las Tablas 18 y 19.

Tabla 18. Datos de partida de la pletina de barra Ómnibus

| | | |
|----------------------|----------|-----|
| NATURALEZA CONDUCTOR | Al-Cu-Fe | Cu |
| DIMENSIÓN MAYOR | mm | 100 |
| DIMENSIÓN MENOR | mm | 10 |
| NÚMERO DE PLETINAS | | 2 |

Tabla 19. Ficha técnica de la pletina de barra Ómnibus

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|---|------------------------|-------------|
| SECCIÓN TOTAL | mm ² | 2.000 |
| COEFICIENTE DE CORTO | | 0,142 |
| CALOR ESPECÍFICO (Ce) | J/(°C·kg) | 383,1 |
| COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR (a) | W/(°C·m) | 5,2 |
| RESISTIVIDAD (20 °C) | μΩ·cm | 1,76 |
| DENSIDAD | kg/m ³ | 8.954 |
| RESISTENCIA ÓHMICA (20 °C) (R) | Ω/km | 0,0088 |
| MASA CONDUCTOR (M) | kg/m | 17,908 |
| SUPERFICIE POR METRO (S) | m | 0,44 |
| $\alpha = a \cdot S/R$ | W/(°C·m ²) | 260.000 |
| $\tau = M \cdot Ce/a \cdot S$ | s | 2.998,49423 |

La capacidad de sobrecarga de la pletina se muestra en la Tabla 20 y la Figura 28.

Tabla 20. Capacidad de sobrecarga de la pletina de barra Ómnibus

| I (KA) | I (A) | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 90°C por sobrecarga Ticable=Tamb | | | | Tiempo (s) hasta que el cable alcanza 200 °C por corto |
|----------|---------|---|--------------|--------------|--------------|--|
| | | Tamb = 40 °C | Tamb = 25 °C | Tamb = 15 °C | Tamb = 0 °C | Tamb = 40 °C |
| 3,606 | 3.606 | 24.883,35079 | | | | |
| 4,111 | 4.111 | 4.396,613405 | 32.597,83633 | | | |
| 4,416 | 4.416 | 3.293,857885 | 6.040,619856 | 29.456,41486 | | |
| 4,838 | 4.838 | 2.430,56987 | 3.838,793733 | 5.368,583608 | 24.675,02012 | |
| 5 | 5.000 | 2.200,802337 | 3.379,33827 | 4.540,103271 | 8.242,47742 | |
| 10 | 10.000 | 417,5765055 | 555,0976961 | 650,4123838 | 799,3179301 | |
| 15 | 15.000 | 178,4527681 | 234,1274334 | 271,8266002 | 329,2792422 | |
| 20 | 20.000 | 99,06981184 | 129,4404844 | 149,8598535 | 180,7520235 | |
| 30 | 30.000 | 43,62743443 | 56,84041271 | 65,68152254 | 78,99225807 | |
| 40 | 40.000 | 24,46227876 | 31,84004816 | 36,76866541 | 44,17681431 | |
| 50 | 50.000 | 15,63285073 | 20,33864333 | 23,4799463 | 28,19807985 | |
| 60 | 60.000 | 10,84749339 | 14,10940847 | 16,28599157 | 19,55383152 | 22,40444444 |
| 70 | 70.000 | 7,965760279 | 10,35962076 | 11,95659015 | 14,35364012 | 16,46040816 |
| 100 | 100.000 | 3,900578426 | 5,07174208 | 5,852772059 | 7,024698606 | 8,0656 |
| 200 | 200.000 | 0,974669017 | 1,267131513 | 1,462122359 | 1,754632405 | 2,0164 |
| 250 | 250.000 | 0,623751672 | 0,810902479 | 0,935676173 | 1,12284645 | 1,290496 |
| 300 | 300.000 | 0,433147117 | 0,563103454 | 0,649744141 | 0,779709867 | 0,896177778 |

Esta pletina soporta:

- 3.606 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 40°C.
- 4.111 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 25°C
- 4.416 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 15°C
- 4.838 A en régimen permanente para lo cual no supera 90°C a la temperatura ambiente de 0°C

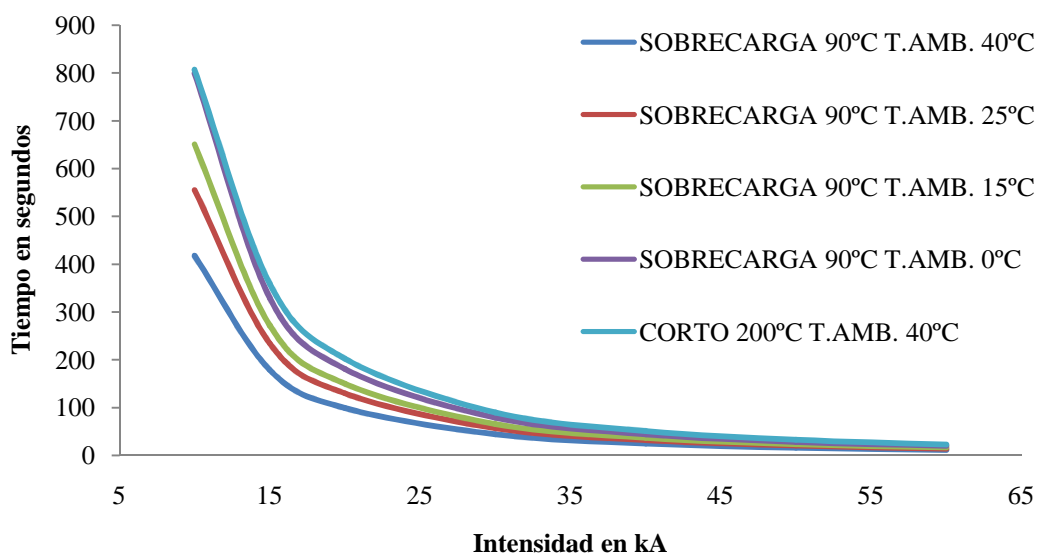


Figura 28. Gráfica de tiempo frente a corriente para la pletina de barra Ómnibus

De la Tabla 20 y la Figura 28 se deduce que este conductor es capaz de soportar:

- 4.111 A en régimen permanente a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 4.100 A en 2 horas a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 15 kA en 5 minutos a una temperatura ambiente de 25 °C
- Más de 300 kA en 1 segundo a una temperatura ambiente de 40 °C

Por lo tanto este conductor soporta las condiciones descritas en la Tabla 5.

3.4. CÁLCULO DE LA RED DE TIERRAS

En este capítulo se pretende seleccionar la instalación de puesta a tierra más adecuada comparando distintos resultados. Para ello se utilizará el REGLAMENTO SOBRE CENTRALES ELÉCTRICAS, SUBESTACIONES Y CENTROS DE TRANSFORMACIÓN, concretamente la Instrucción Técnica Complementaria MIE-RAT 13 [22] y la IEE No.80 Guide for Safety in AC Substations Grounding [23].

Las "puestas a tierra" se establecen para limitar la tensión con respecto a tierra que puedan presentar las distintas masas metálicas. Se entiende por "poner a tierra" la unión de un electrodo o grupo de electrodos, enterrados en el suelo, con determinados elementos de la instalación mediante uniones metálicas de sección suficiente, directas y sin protección alguna. El objetivo de la unión es conseguir que en el conjunto de instalaciones y superficies de terreno próximo no haya diferencias de potencial peligrosas. También debe permitir el paso a tierra de las corrientes de falta o de las descargas de origen atmosférico.

Por lo tanto, se debe diseñar una instalación de puesta a tierra que garantice que en cualquier punto, interior o exterior, por donde pueda haber circulación de personas, estas sólo queden sometidas como máximo a las tensiones de paso y contacto fijadas en el MIE-RAT 13.

Para la correcta elección del sistema de puesta a tierra se siguen estos pasos:

1. Investigación de las características del suelo
2. Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo máximo de eliminación del defecto.
3. Cálculo de las tensiones de paso y contacto máximas permitidas
4. Diseño del sistema de puesta a tierra comprobando que no se superan los máximos admisibles.
5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

3.4.1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Se necesita conocer la resistividad del terreno para después poder elegir la disposición de los conductores en el mismo y hacer un diseño correcto de la red de tierras.

En la Tabla 21 se muestran los valores de resistividades típicos según la composición del terreno:

Tabla 21. Resistividad en función del terreno

| NATURALEZA DEL TERRENO | RESISTIVIDAD EN $\Omega \cdot m$ |
|--|--|
| Terrenos pantanosos | De algunas unidades a 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humus | 10 a 150 |
| Turba húmeda | 5 a 100 |
| Arcilla plástica | 50 |
| Margas y arcillas compactas | 100 a 200 |
| Margas de jurásico | 30 a 40 |
| Arena arcillosa | 50 a 500 |
| Arena sicilosa | 200 a 3.000 |
| Suelo pedregoso cubierto de césped | 300 a 500 |
| Suelo pedregoso desnudo | 1.500 a 3.000 |
| Calizas blandas | 100 a 300 |
| Calizas compactas | 1.000 a 5.000 |
| Calizas agrietadas | 500 a 1.000 |
| Pizarras | 50 a 300 |
| Rocas de mica y cuarzo | 800 |
| Granitos y gres procedentes de alteración | 1.500 a 10.000 |
| Granitos y gres muy alterados | 100 a 600 |
| Hormigón | 2.000 a 3.000 |
| Basalto o grava | 3.000 a 5.000 |

Los valores de la tabla son los que aparecen en el MIE-RAT 13, pero siempre como valores orientativos por lo que habría que realizar un estudio real de la resistividad del terreno. Para ello el método más utilizado y recomendado es el método Wenner.

En el caso de la subestación de estudio la resistividad media del terreno es de 60 Ωm .

3.4.2. CORRIENTES MÁXIMAS DE PUESTA A TIERRA Y TIEMPO MÁXIMO DE ELIMINACIÓN DEL DEFECTO.

Al producirse un defecto a tierra aparece la correspondiente corriente de defecto que debe ser detectada por un dispositivo de control. Dicho dispositivo transmite la orden de actuación a un elemento de corte, que se abrirá eliminando el defecto. El tiempo máximo de eliminación de defecto fijará también los valores máximos para la tensión de paso y contacto. Dicho tiempo dependerá de las protecciones utilizadas y como estas responden a curvas tiempo-corriente se necesitaría trabajar con distintos puntos de la curva, entre la corriente mínima y máxima de defecto.

Por lo general, las compañías suministradoras definen valores típicos de intensidades de defecto y tiempos de eliminación de estos para cada nivel de tensión.

Los datos de cálculo que se utilizarán para este caso, se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Intensidad y tiempo de defecto

| Intensidad de defecto a disipar por la malla | Tiempo de operación de la unidad instantánea de tierra de la Compañía |
|--|---|
| 14.300 A | 0,5 segundos |

3.4.3. CÁLCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO MÁXIMAS PERMITIDAS

En la Instrucción Técnica MIE-RAT 1 [24] se definen los conceptos de tensión de paso y contacto como:

- *Tensión de paso: se define como la parte de la tensión de puesta a tierra que puede ser punteada por una persona entre los dos pies considerando una distancia de un metro entre ellos.*
- *Tensión de contacto: es la fracción de la tensión de puesta a tierra que puede ser puentada por una persona entre la mano y el pie (considerando un metro) o entre ambas manos.*

Según el MIE-RAT 13, los valores máximos estimados para estas tensiones, para el interior de la instalación, se calculan con las siguientes expresiones:

Tensión de paso (V)

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1.000}\right) \quad (72)$$

Tensión de contacto (V)

$$V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1.000}\right) \quad (73)$$

Siendo:

| | |
|--------------------|---|
| ρ_s | Resistividad de la capa superficial del terreno |
| t | Duración de la falta en segundos |
| K y n | Constantes que dependen del tiempo |
| $0,1 < t \leq 0,9$ | $K=72$ $n=1$ |
| $0,9 < t \leq 3$ | $K=78.5$ $n=0,18$ |

Como la resistividad de la capa superficial del terreno donde se realiza la instalación de puesta a tierra es de 2.000 Ωm , se han calculado los distintos valores máximos

admisibles para las tensiones de paso y contacto en función del tiempo y la resistividad, estos valores aparecen en la Tabla 23.

Tabla 23. Cálculo de las tensiones de paso y contacto máximas admisibles

| TENSIONES DE PASO Y CONTACTO MÁXIMAS ADMISIBLES | | | | | |
|--|----------|----------|---|----------------------------|--------------------------------|
| t (s) | K | N | $\rho_s (\Omega \cdot m)$ | Tensión de paso (V) | Tensión de contacto (V) |
| 0,4 | 72 | 1 | 2.000 | 23.400 | 720 |
| 0,5 | 72 | 1 | 2.000 | 18.720 | 576 |
| 0,6 | 72 | 1 | 2.000 | 15.600 | 480 |
| 0,7 | 72 | 1 | 2.000 | 13.371,43 | 411,43 |
| 0,8 | 72 | 1 | 2.000 | 11.700 | 360 |
| 0,9 | 72 | 1 | 2.000 | 10.400 | 320 |
| 1 | 78,5 | 0,18 | 2.000 | 9.360 | 288 |

El cálculo es aproximado pues a la hora de deducir las fórmulas utilizadas, el MIE-RAT 13 indica que se desprecia la resistencia de la piel y del calzado de la persona. Así mismo se supone una resistencia del cuerpo humano de 1.000Ω y se toma cada pie como un electrodo con forma de placa de superficie 200 centímetros cuadrados.

Los valores máximos de tensión de paso y contacto para la subestación de estudio serán por tanto:

$$V_{\text{paso máx}} = 18.720 \text{ V}$$

$$V_{\text{contacto máx}} = 576 \text{ V}$$

3.4.4. DISEÑO DEL SISTEMA COMPROBANDO QUE NO SE SUPERAN LOS MÁXIMOS ADMISIBLES

Se calculan las tensiones de paso y contacto máximas previsibles en la instalación y se comprueba que no superan los valores máximos admisibles ya calculados.

Las tensiones de paso y contacto máximas previsibles se calculan con las siguientes expresiones:

$$V_p = \frac{K_i \cdot K_p \cdot \rho \cdot I_d}{L} \quad (74)$$

$$V_c = \frac{K_i \cdot K_m \cdot \rho \cdot I_d}{L} \quad (75)$$

Siendo:

K_p, K_m Constantes que dependen de la configuración y geometría de la malla

K_i Coeficiente corrector de la desigualdad de la intensidad disipada

ρ Resistividad del terreno

I_d Intensidad de defecto

L Longitud total enterrada

Los coeficientes K_p , K_i y K_m se calculan con las siguientes expresiones:

$$K_i = 0,65 + 0,172 \cdot n \quad (76)$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{h + D} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{D \cdot j} \right) \quad (77)$$

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} \right) + \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left(\prod_{j=3}^{2n-3} \frac{j}{j+1} \right) \quad (78)$$

Siendo

n Número de conductores paralelos

h Profundidad de la malla

D Separación entre conductores en la misma dirección

d Diámetro equivalente del conductor enterrado, en este caso

Cuyos valores son:

0,8 m de profundidad de malla ($h=0,8$ m)

5,27 m de distancia entre conductores, calculada como:

$$D = \frac{\text{Longitud malla longitudinal}}{n^{\circ} \text{ conductores longitudinales} + 1} = 5,27 \text{ m} \quad (79)$$

0,011 m de diámetro equivalente del conductor enterrado ($d=0,011$ m)

Finalmente, el diseño de la malla de puesta a tierra elegido se muestra en la Tabla 24:

Tabla 24. Diseño final de puesta a tierra

| | LONGITUDINAL | TRANSVERSAL |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Distancia (m) | 63 | 29 |
| Nº de conductores | 12 | 9 |
| Tensión de paso previsible (V) | 427 | 305 |
| Tensión de contacto previsible (V) | 565 | 561 |
| K_i | 2,714 | 2,198 |
| K_p | 0,373 | 0,329 |
| K_m | 0,494 | 0,606 |
| Número de picas | 90 | |

Esta configuración del sistema de puesta a tierra no supera las tensiones máximas permitidas de paso y contacto, por lo que sería una configuración válida.

3.4.5. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

El MIE-RAT 1 define la resistencia de tierra como "*la resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero*". Por lo tanto, la resistencia de tierra es el cociente entre la tensión que alcanza una instalación de puesta a tierra con respecto a un punto de potencial nulo y la corriente que lo recorre. Cuanto menor sea la resistencia de puesta a tierra mejor protegida estará la instalación de tierra (en caso de haber una corriente de falla, a menor resistencia menor será la caída de tensión creada).

En el MIE-RAT 13 se especifican las fórmulas a utilizar en el cálculo de la resistencia de tierra según el tipo de electrodo utilizado, dichas expresiones aparecen en la Tabla 25:

Tabla 25. Fórmulas de cálculo de la resistencia de tierra

| TIPO DE ELECTRODO | RESISTENCIA EN OHMIOS |
|-------------------------------------|--|
| Placa enterrada profunda | $R = 0,8 \frac{\rho}{P}$ |
| Placa enterrada superficial | $R = 1,6 \frac{\rho}{P}$ |
| Pica vertical | $R = \frac{\rho}{L}$ |
| Conductor enterrado horizontalmente | $R = \frac{2\rho}{L}$ |
| Malla de tierra | $R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$ |

Como la red de tierra diseñada es mallada, se calcula la resistencia de puesta a tierra con la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{L} \quad (80)$$

Siendo:

- R Resistencia de puesta a tierra en Ω
- ρ Resistividad del terreno en $\Omega \cdot m$
- L Longitud total de los conductores enterrados en la malla (más las picas) en m
- r Radio en metros de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla (radio equivalente)

A su vez se calcula el radio equivalente como:

$$r = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} \quad (81)$$

Las dimensiones "a" y "b" son las indicadas en la Figura 29.

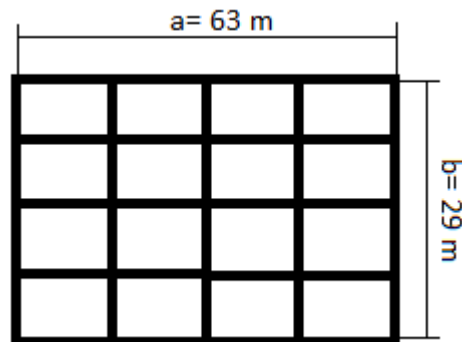


Figura 29. Dimensiones de la malla

La longitud total de los conductores enterrados en la malla, más las picas, se calcula como:

$$L = (9 \text{ carriles transversales} \cdot 29 \text{ m}) + (12 \text{ carriles longitudinales} \cdot 63 \text{ m}) + (\text{número de picas} \cdot 10 \text{ m}) + \text{longitud de conexión de equipos} \quad (82)$$

Se considera la longitud de conexión de los equipos igual a 120 m y la longitud de las picas de 10 m.

Los resultados del cálculo de la resistencia de puesta a tierra se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Resultados del cálculo de la resistencia de puesta a tierra

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Resistividad del terreno | 60 $\Omega \cdot m$ |
| Longitud total | 2.037 m |
| Radio equivalente | 24,12 m |
| Sección de la malla | 1.827 m ² |
| Resistencia a tierra | 0,65 Ω |

3.5. ELECCIÓN DEL PARARRAYOS

En este apartado se pretende elegir el pararrayos que mejor se adapte al funcionamiento de la subestación. El uso del pararrayos tiene como objetivo dar el mayor margen de protección posible ante sobretensiones. Si el equipo está protegido con el pararrayos adecuado, las sobretensiones nunca superarán el valor máximo que el equipo pueda soportar. Cabe destacar que el pararrayos se conecta entre fase y tierra.

El Margen de Protección que debe cubrir el pararrayos elegido se calcula mediante la siguiente expresión [25]:

$$MP = \left[\frac{NA}{NP} - 1 \right] 100 \geq 33\% \quad (83)$$

Siendo:

- MP Margen de protección del pararrayos: debe ser siempre superior al 33%
- NA Nivel de aislamiento del equipo: valor de la tensión soportada por el equipo ante impulsos tipo rayo.
- NP Nivel de protección del pararrayos: valor de tensión residual del pararrayos para un impulso que se corresponda con la intensidad nominal de descarga de 10 kA.

3.5.1. PARÁMETROS A CONSIDERAR EN LA ELECCIÓN DEL PARARRAYOS

Para realizar una correcta selección del pararrayos deben conocerse tres parámetros fundamentales del mismo:

- Intensidad nominal de descarga/Capacidad de absorción de energía
- Tensión nominal
- Capacidad para soportar sobretensiones temporales

1.- INTENSIDAD NOMINAL DE DESCARGA/CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA

Según la norma UNE-EN 60099-4 [26], el pararrayos se selecciona en función de la corriente que va a circular por él, ya que la capacidad de absorción de energía está directamente relacionada con la intensidad nominal de descarga.

Atendiendo a la "Recomendación para la selección y utilización del pararrayos" (CEI 99-5) [27], en redes de hasta 245 kV de tensión máxima se utilizan, preferentemente, pararrayos de 10 kA de corriente nominal de descarga, aunque los de 5 kA también podrían ser suficientes.

Para redes con tensiones de hasta 420 kV también son válidos los pararrayos de 10 kA.

2.- Tensión NOMINAL

La selección del pararrayos en función de la tensión nominal se basa en encontrar el de menor tensión que pueda garantizar una protección eficaz durante el mayor tiempo posible. En la ya citada norma UNE-EN 60099-4 se especifican los valores de tensión nominal y tensión de servicio continuo que han de tener los pararrayos.

La selección de la tensión nominal y de servicio continuo de los pararrayos debe hacerse atendiendo a una serie de criterios:

- a) Si en la red en la que va a usarse el pararrayos hay eliminación automática de los defectos a tierra, la tensión de servicio continuo será igual a:

$$U_c = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3}} 1,05 \quad (84)$$

Siendo:

| | |
|-------------------|------------------------------|
| U_c | Tensión de servicio continuo |
| $V_{m\acute{a}x}$ | Tensión de línea máxima |

El factor 1,05 tiene en cuenta el valor de cresta que puede presentar la tensión a causa de los armónicos.

- b) En las redes donde no haya eliminación automática de los defectos a tierra y, por lo tanto, el neutro esté aislado o puesto a tierra a través de una bobina de compensación, el valor de la tensión de servicio continuo se calcula como:

$$U_c = V_{m\acute{a}x} \quad (85)$$

Siendo:

| | |
|-------------------|------------------------------|
| U_c | Tensión de servicio continuo |
| $V_{m\acute{a}x}$ | Tensión de línea máxima |

3.- CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBRETENSIONES TEMPORALES

Las sobretensiones provocan un aumento de la corriente que circula por el pararrayos, lo que hace que la energía consumida por este sea mayor y su temperatura se eleve llegando a afectar a su estabilidad térmica.

Las sobretensiones pueden producirse por dos motivos: defectos a tierra y pérdidas repentinas de carga.

a) Defectos a tierra:

Al producirse un cortocircuito en una fase, se eleva la tensión a tierra de las otras dos fases. Si el neutro está aislado o puesto a tierra mediante una impedancia, las sobretensiones pueden alcanzar valores iguales a la tensión máxima entre fases.

Para los casos con neutro rígido a tierra, como es el caso de estudio, las sobretensiones no superan el 140% de la tensión máxima.

La duración de las sobretensiones es igual al tiempo que tarda en despejarse la falta. Para redes donde la falta se despeja automáticamente este tiempo suele ser menor de 1 s. Para redes con neutro aislado o puesto a tierra por medio de una bobina, donde la eliminación de defectos no es automática, el tiempo de despeje no suele superar los 10 s.

b) Pérdidas repentinas de carga:

Para redes de hasta 72 kV las sobretensiones por pérdidas repentinas de carga se calculan multiplicando la tensión nominal por 1,2.

Para redes grandes, las pérdidas de carga repentinas puede elevar la tensión hasta 1,5 veces la tensión a tierra.

3.5.2. ELECCIÓN FINAL

En el caso de estudio, la tensión asignada es de 45 kV y la tensión máxima, según la Tabla 27, es de 52 kV. Por lo tanto, la tensión máxima con respecto a tierra será:

$$V_t = \frac{52}{\sqrt{3}} = 30,02 \text{ kV} \quad (86)$$

Tabla 27. Pararrayos INAEL [25]

| Tensión entre fases kV | | Circuito con eliminación automática de defectos a tierra | | Circuitos con neutro aislado o puesto a tierra sin eliminación automática de los defectos a tierra | |
|------------------------|--------|--|------|--|------|
| ASIGNADA | MÁXIMA | PARARRAYOS | | PARARRAYOS | |
| | | Ur | Uc | Ur | Uc |
| 2,4 | 2,52 | 3 | 2,55 | 3 | 2,55 |
| 3* | 3,6 | 3 | 5,1 | 6 | 5,1 |
| 4,16 | 4,37 | 6 | 2,55 | 6 | 5,1 |
| 4,8 | 5,04 | 6 | 5,1 | 6 | 5,1 |
| 6* | 7,2 | 6 | 5,1 | 9 | 7,65 |
| 6,9 | 7,25 | 6 | 5,1 | 9 | 7,65 |
| 8,32 | 8,74 | 6 | 5,1 | 10 | 8,4 |
| 10* | 12 | 9 | 7,65 | 12 | 10,2 |
| 12 | 12,7 | 10 | 8,4 | 18 | 15,3 |
| 13,2 | 13,9 | 12 | 10,2 | 18 | 15,3 |
| 13,8 | 14,5 | 12 | 10,2 | | |
| 15* | 17,5 | 15 | 12,7 | 18 | 15,3 |
| 20* | 24 | 21 | 17 | 24 | 19,5 |
| 23 | 24,2 | 21 | 17 | 30 | 24,4 |
| 24,9 | 26,1 | 21 | 17 | 36 | 29 |
| 30* | 36 | 30 | 24,4 | | |
| 34,5 | 36,2 | 30 | 24,4 | 45 | 36,5 |
| 45* | 52 | 42 | 34,6 | 48 | 36,5 |
| 46 | 48,3 | 439 | 31,5 | 54 | 42 |
| 66* | 72,5 | 66 | 54 | 72 | 57 |
| 69 | 72,5 | 60 | 48 | 72 | 57 |
| 110* | 123 | 108 | 84 | 120 | 98 |
| 115 | 121 | 108 | 84 | 120 | 98 |
| 132* | 145 | 120 | 98 | 144 | 115 |
| 138 | 145 | 120 | 98 | 144 | 155 |
| 161 | 169 | 144 | 115 | | |
| 220* | 245 | 180 | 144 | | |
| 230 | 242 | 180 | 144 | | |
| 380 | 420 | 336 | 270 | | |

*Valores del RCE

Para subestaciones de hasta 230 kV se utilizan pararrayos tipo ZS y, según la Tabla 27, como en el caso de estudio hay eliminación automática de defectos a tierra, el pararrayos supuestamente más adecuado tendría una tensión asignada de 42 kV y una tensión de servicio continuo de 34,8 kV. Para saber si el supuesto pararrayos es válido, hay que calcular las tensiones máximas que deberá soportar analizando los tres parámetros mencionados en el apartado anterior.

1.- INTENSIDAD NOMINAL DE DESCARGA/CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA

Como la tensión nominal del primario de la subestación es de 45 kV y por lo tanto menor a 245 kV, la intensidad nominal de descarga será de 10 kA.

2.- TENSIÓN NOMINAL

En el caso de estudio los defectos a tierra se eliminan de forma automática por lo que la tensión en servicio continuo que debe tener el pararrayos se calcula como:

$$U_c = 1,05 \cdot U_t = 1,05 \cdot 30,02 = 31,52 \text{ kV} \quad (87)$$

Siendo:

U_c Tensión de servicio continuo del pararrayos en kV

U_t Tensión máxima del sistema con respecto a tierra en kV

3.- CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBRETENSIONES TEMPORALES

- a) Defectos a tierra: para la subestación de estudio el tipo de conexión del neutro es **rígido a tierra**, por lo que las sobretensiones por defectos a tierra se calculan como:

$$U_{defecto} = 1,4 \cdot U_t = 1,4 \cdot 30,02 = 42,03 \text{ kV} \quad (88)$$

Siendo:

$U_{defecto}$ Sobretensión por defecto a tierra que debe soportar el pararrayos durante 1 s

U_t Tensión máxima con respecto a tierra

- b) Pérdidas bruscas de carga: al ser la tensión asignada menor de 72 kV, las sobretensiones por pérdidas bruscas de carga se calculan mediante la siguiente expresión:

$$U_{pérdidas} = 1,2 \cdot U_N = 1,2 \cdot 45 = 54 \text{ kV} \quad (89)$$

Siendo:

$U_{\text{pérdidas}}$

Sobretensión por pérdida brusca de carga
en kV que debe soportar el pararrayos
durante 10 s

U_N

Tensión nominal en kV

Además de estos tres parámetros hay que calcular el Margen de Protección que puede aportar el pararrayos y que debe ser mayor del 33%.

Por lo tanto, conocidos todos los parámetros, el pararrayos elegido debe cumplir:

- Debe tener una tensión de servicio continuo superior a 31,52 kV
- Debe soportar una sobretensión de 54 kV durante 1 s
- Debe soportar una sobretensión de 42,03 kV durante 10 s
- Debe tener un Margen de Protección superior al 33%

Un pararrayos de 42 kV de tensión asignada tiene una tensión de servicio continuo de 34,6 kV y según el gráfico de la Figura 30 puede soportar:

- Una sobretensión de $1,43 \cdot U_c$ durante un segundo:

$$1,43 \cdot U_c = 1,43 \cdot 34,6 = 49,478 \text{ kV}$$

- Una sobretensión de $1,36 \cdot U_c$ durante 10 segundos:

$$1,36 \cdot U_c = 1,36 \cdot 34,6 = 47,06 \text{ kV}$$

Por lo tanto el pararrayos de 42 kV de tensión asignada no sería válido, ya que no es capaz de soportar las sobretensiones de 54 kV durante 1 segundo.

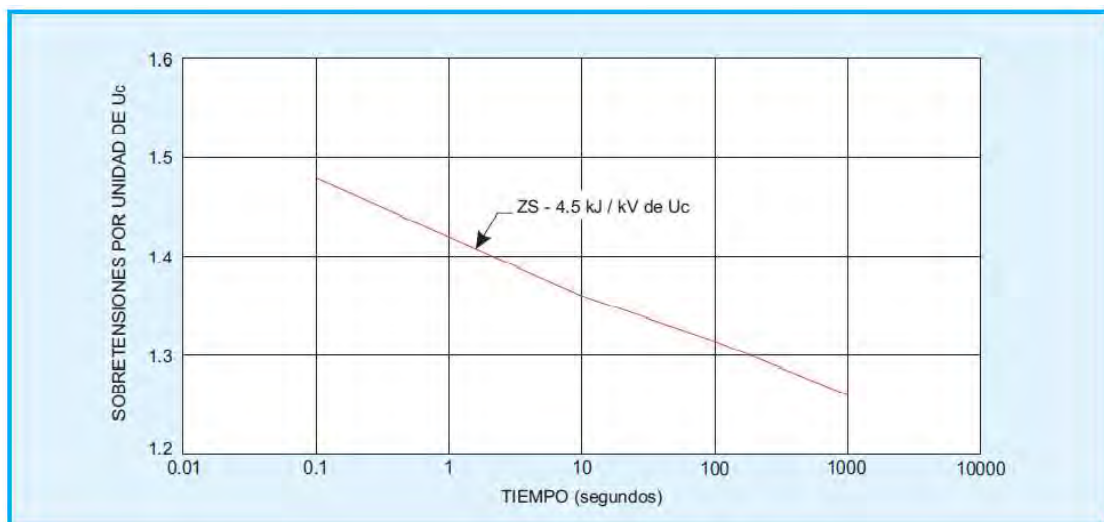


Figura 30. Gráfico pararrayos INAEL [25]

Como el criterio de selección del pararrayos es el de menor tensión, el siguiente candidato sería el de 66 kV de tensión asignada y 54 kV de tensión de servicio continuo.

De nuevo, según los datos proporcionados por la Figura 28 se sabe que este pararrayos es capaz de soportar:

- Una sobretensión de $1,43 \cdot U_c$ durante 1 segundo

$$1,43 \cdot U_c = 1,43 \cdot 54 = 77,22 \text{ kV} \quad (90)$$

- Una sobretensión de $1,36 \cdot U_c$ durante 10 segundos:

$$1,36 \cdot U_c = 1,36 \cdot 54 = 73,44 \text{ kV} \quad (91)$$

En vista de los resultados, el pararrayos cumple con las especificaciones de tensiones ya que:

- Tiene una tensión de servicio continuo superior a 31,52 kV.
- Es capaz de soportar una sobretensión de 54 kV durante 1 segundo. De hecho, la máxima sobretensión que es capaz de soportar durante un segundo es de 77,22 kV.
- Es capaz de soportar una sobretensión de 42,03 kV durante 10 segundos.

Además, el margen de protección ofrecido por el pararrayos de 66 kV de tensión nominal y 54 kV de tensión de servicio continuo debe ser superior al 33%.

El nivel de aislamiento para una instalación de 45 kV, con una tensión máxima de 52 kV es de 250 kV. Este valor se obtiene de la Tabla 28, extraída del MIE-RAT 12:

Tabla 28. Niveles de aislamiento. MIE RAT 12 [28]

| TENSION MAS ELEVADA PARA EL MATERIAL (Um) | TENSION SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO RAYO | TENSION SOPORTADA NOMINAL DE CORTA DURACION A FRECUENCIA INDUSTRIAL |
|---|--|---|
| kV eficaces | kV cresta | kV eficaces |
| 52 | 250 | 95 |
| 72,5 | 325 | 140 |
| 123 | 450 | 185 |
| 145 | 550 | 230 |
| 170 | 650 | 275 |
| 245 | 750 | 325 |
| | 850 | 360 |
| | 950 | 395 |
| | 1 050 | 460 |

Según la Tabla 29, el nivel de protección que puede ofrecer un pararrayos de 66 kV de tensión nominal con un impulso de corriente de 10 kA es de 149 kV.

Tabla 29. Características de funcionamiento del pararrayos ZS. INAEL [25]

| Tensión Asignada Ur (kV eficaces) | Tensión Continua Uc* (kV eficaces) | STT ⁽¹⁾ | | Equivalente al frente de onda ** (kV cresta) | Máxima sobretensión de maniobra *** (kV cresta) | Tensión residual máxima (kV cresta) Usando una onda de corriente 8/20 µseg | | | | | | |
|--|---|----------------------|-----------------------|--|---|---|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 s (kV eficaces) | 10 s (kV eficaces) | | | 1.5 kA | 3 kA | 5 kA | 10 kA | 15 kA | 20 kA | 40 kA |
| 3 | 2.55 | 3.7 | 3.5 | 7.4 | 5.7 | 6.5 | 6.8 | 6.9 | 7.3 | 7.7 | 8.0 | 8.6 |
| 6 | 5.10 | 7.4 | 7.1 | 14.7 | 11.3 | 13.1 | 13.5 | 13.9 | 14.6 | 15.5 | 16.1 | 17.2 |
| 9 | 7.65 | 11.1 | 10.6 | 22.1 | 17.0 | 19.6 | 20.3 | 20.8 | 21.8 | 23.2 | 24.1 | 25.8 |
| 10 | 8.40 | 12.2 | 11.6 | 24.5 | 18.9 | 21.8 | 22.5 | 23.2 | 24.3 | 25.8 | 26.8 | 28.7 |
| 12 | 10.2 | 14.8 | 14.1 | 29.4 | 22.6 | 26.2 | 27.0 | 27.8 | 29.1 | 31.0 | 32.1 | 34.4 |
| 15 | 12.7 | 18.4 | 17.6 | 36.8 | 28.3 | 32.7 | 33.8 | 34.7 | 36.4 | 38.7 | 40.1 | 43.0 |
| 18 | 15.3 | 22.2 | 21.2 | 44.1 | 34.0 | 39.3 | 40.5 | 41.7 | 43.7 | 46.5 | 48.2 | 51.6 |
| 21 | 17.0 | 24.7 | 23.5 | 51.5 | 39.6 | 45.8 | 47.3 | 48.6 | 51.0 | 54.2 | 56.2 | 60.2 |
| 24 | 19.5 | 28.3 | 27.0 | 56.4 | 43.4 | 50.2 | 51.8 | 53.3 | 55.8 | 59.2 | 61.5 | 65.9 |
| 27 | 22.0 | 32.0 | 30.4 | 63.7 | 49.1 | 56.7 | 58.5 | 60.2 | 63.1 | 67.2 | 69.6 | 74.5 |
| 30 | 24.4 | 35.4 | 33.8 | 71.1 | 54.7 | 63.3 | 65.3 | 67.1 | 70.4 | 74.9 | 77.6 | 83.1 |
| 36 | 29.0 | 42.1 | 40.1 | 84.1 | 64.8 | 74.9 | 77.3 | 79.5 | 83.3 | 88.7 | 91.8 | 98.4 |
| 39 | 31.5 | 45.8 | 43.6 | 91.5 | 70.4 | 81.4 | 84.1 | 86.4 | 90.6 | 96.4 | 100 | 107 |
| 45 | 36.5 | 53.0 | 50.5 | 107 | 82.4 | 95.3 | 98.3 | 101 | 106 | 113 | 117 | 125 |
| 48 | 39.0 | 56.7 | 54.0 | 113 | 86.8 | 100 | 104 | 107 | 112 | 119 | 123 | 132 |
| 54 | 42.0 | 61.0 | 58.1 | 118 | 90.7 | 105 | 108 | 111 | 117 | 124 | 129 | 138 |
| 60 | 48.0 | 69.7 | 66.4 | 134 | 103 | 120 | 123 | 127 | 133 | 142 | 147 | 157 |
| 66 | 54.0 | 78.4 | 74.7 | 151 | 116 | 134 | 139 | 143 | 149 | 159 | 165 | 177 |
| 72 | 57.0 | 82.8 | 78.9 | 160 | 124 | 143 | 147 | 152 | 159 | 169 | 175 | 188 |
| 90 | 70.0 | 102 | 96.9 | 199 | 153 | 177 | 183 | 188 | 197 | 210 | 217 | 233 |
| 96 | 76.0 | 110 | 105 | 218 | 168 | 194 | 200 | 206 | 216 | 230 | 238 | 255 |
| 108 | 84.0 | 122 | 116 | 235 | 181 | 210 | 216 | 222 | 233 | 248 | 257 | 275 |
| 120 | 98.0 | 142 | 136 | 273 | 224 | 243 | 251 | 258 | 271 | 288 | 298 | 320 |
| 132 | 106 | 154 | 147 | 302 | 248 | 269 | 277 | 285 | 299 | 318 | 329 | 353 |
| 144 | 115 | 167 | 159 | 321 | 263 | 286 | 295 | 303 | 318 | 338 | 350 | 375 |
| 168 | 131 | 190 | 181 | 370 | 303 | 329 | 340 | 349 | 366 | 390 | 404 | 432 |
| 172 | 140 | 203 | 194 | 391 | 321 | 348 | 359 | 370 | 387 | 412 | 427 | 457 |

Por lo tanto el margen de protección ofrecido por este pararrayos sería:

$$MP = \left(\frac{NA}{NP} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{250}{149} - 1 \right) \cdot 100 = 67,78 \% \geq 33\% \quad (92)$$

Siendo:

NA Nivel de Aislamiento para una tensión máxima en la subestación 52 kV.

NP Nivel de Protección del pararrayos de 66 kV de tensión nominal

Por lo tanto, como el pararrayos de 66 kV de tensión nominal cumple con todas las especificaciones en cuanto a tensión y aporta un margen de protección superior al 33%, es el pararrayos elegido.

Capítulo 4

DEFINICIÓN DE APARAMENTA

4.1. INSTALACIONES DE 45 kV

En este apartado se analizará la aparamenta situada entre las líneas eléctricas de llegada y el secundario de los grupos transformadores-rectificadores. Toda esta zona se encuentra a una tensión nominal de 45 kV

4.1.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA

En este apartado se pretende definir el conjunto de instalaciones situadas entre las líneas eléctricas de llegada hasta el embarrado general de la subestación, donde comienzan las competencias de ADIF.

POSICIÓN DE ENTRADA DE LÍNEA

La aparamenta descrita a continuación se encuentra ubicada en el parque intemperie de la subestación. Cada entrada de línea consta de:

- Seccionador tripolar giratorio de tres columnas y apertura lateral, provisto de cuchillas, puesta a tierra y accionamiento manual.

| | |
|------------------------------|-------|
| FABRICANTE | DIGUN |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 800 A |
| INTENSIDAD DE CORTA DURACIÓN | 20 kA |
| MÁXIMA INTENSIDAD ADMISIBLE | 50 kA |

- Interruptor automático de potencia trifásico, para intemperie, con aislamiento en SF6.

| | |
|----------------------------|--------------|
| FABRICANTE | ABB |
| TIPO | EDF SK 52 kV |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 2.500 A |
| CORRIENTE NOMINAL DE CORTE | 25 kA |
| CORRIENTE DE CIERRE | 62,5 kA |



- Tres transformadores de intensidad para protección y medida, servicio exterior.

| | |
|----------------------------|----------------------|
| FABRICANTE | ARTECHE |
| TIPO | CXG 52 |
| AISLAMIENTO | Porcelana o silicona |
| TENSIÓN MÁXIMA DE SERVICIO | 52 kV |
| TENSIONES DE ENSAYO | 90/250 kV |

- Transformador de tensión de protección y medida, servicio exterior

| | |
|----------------------------|-----------------|
| FABRICANTE | ARTECHE |
| TIPO | UTB 52 |
| AISLAMIENTO | De papel aceite |
| TENSIÓN MÁXIMA DE SERVICIO | 52 kV |
| TENSIONES DE ENSAYO | 90/250 kV |

- Embarrado en parque de intemperie a 45 kV, formado por un cable RAIL cuyos datos y ficha técnica se recogen en las Tablas 6 y 7.

4.1.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ADIF

Son competencia de ADIF el conjunto de aparamenta eléctrica para la protección de la subestación, de sus grupos transformadores-rectificadores y el trafo de SS.AA.

PROTECCIÓN GENERAL DE LA SUBESTACIÓN

La protección general, competencia de ADIF, consta de:

- Seccionador tripolar giratorio de dos columnas y apertura lateral. Accionamiento eléctrico.

| | |
|------------------------------|---------------|
| FABRICANTE | MESA |
| MODELO | SGCP 52/1.250 |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 1250 A |
| INTENSIDAD DE CORTA DURACIÓN | 31,5 kA |
| INTENSIDAD DE CRESTA | 80 kA |
| TENSIÓN DE PRUEBAS | 110/290 kV |

- Interruptor automático de potencia trifásico de servicio exterior. Aislamiento en SF6 y accionamiento motorizado.

| | |
|----------------------------|--------------|
| FABRICANTE | ABB |
| TIPO | EDF SK 52 kV |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 2.500 A |
| CORRIENTE NOMINAL DE CORTE | 25 kA |
| CORRIENTE DE CIERRE | 62,5 kA |

- Tres transformadores de intensidad para protección y medida, de servicio exterior.

| | |
|----------------------------|----------------------|
| FABRICANTE | ARTECHE |
| TIPO | CXG 52 |
| AISLAMIENTO | Porcelana o silicona |
| TENSIÓN MÁXIMA DE SERVICIO | 52 kV |
| TENSIONES DE ENSAYO | 90/250 kV |

Un ejemplo de estos transformadores de intensidad son los mostrados en la Figura 31:



Figura 31. Transformadores de intensidad en la subestación de Villaverde Alto

- Seccionador giratorio tripolar de dos columnas, apertura lateral, accionamiento manual.

| | |
|------------------------------|---------------|
| FABRICANTE | MESA |
| MODELO | SGCP 52/1.250 |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 1.250 A |
| INTENSIDAD DE CORTA DURACIÓN | 31,5 kA |
| INTENSIDAD DE CRESTA | 80 kA |
| TENSIÓN DE PRUEBAS | 110/290 kV |

- Embarrado en parque intemperie a 45 kV, formado por un cable de cobre de 120 mm², cuyos datos y ficha técnica se describen en las Tablas 9 y 10.

Algunos de los elementos descritos hasta ahora aparecen en la Figura 32:



Figura 32. Aparata para la protección general de la subestación de Villaverde Alto

Del embarrado general de ADIF derivan las protecciones para la alimentación de los grupos transformadores-rectificadores y transformador de servicios auxiliares.

PROTECCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE LOS GRUPOS RECTIFICADORES

Los transformadores de grupo tiene la función de reducir la tensión desde los 45 kV del devanado primario hasta los 1,3 kV del devanado secundario. La protección de cada grupo transformador-rectificador está constituida por:

- Seccionador giratorio tripolar de 2 columnas, apertura lateral, accionamiento manual.

| | |
|------------------------------|---------------|
| FABRICANTE | MESA |
| MODELO | SGCP 52/1.250 |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 1.250 A |
| INTENSIDAD DE CORTA DURACIÓN | 31,5 kA |
| INTENSIDAD DE CRESTA | 80 kA |
| TENSIÓN DE PRUEBAS | 110/290 kV |

- Interruptor automático de potencia trifásico de servicio exterior. Aislamiento en SF6 y accionamiento motorizado.

| | |
|----------------------------|--------------|
| FABRICANTE | ABB |
| TIPO | EDF SK 52 kV |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 2.500 A |
| CORRIENTE NOMINAL DE CORTE | 25 kA |
| CORRIENTE DE CIERRE | 62,5 kA |

- Tres transformadores de intensidad para protección y medida, de servicio exterior.

FABRICANTE

ARTECHE

TIPO

CXG 52

AISLAMIENTO

Porcelana o silicona

TENSIÓN MÁXIMA DE SERVICIO

52 kV

TENSIONES DE ENSAYO

90/250 kV

- El conductor de entrada al transformador de potencia es un tubo de cobre de 36x40 mm de diámetro, interior y exterior respectivamente, cuyos datos y ficha técnica se describen en las Tablas 10 y 11.
- Entre el transformador de potencia y el rectificador se utiliza una pletina de cobre de 80x100 mm, cuyos datos y ficha técnica se describen en las Tablas 15 y 17.

Los transformadores de intensidad descritos en este apartado aparecen remarcados en la Figura 33.



Figura 33. Trafos de intensidad para protección y medida de los grupos transformadores. Villaverde Alto

PROTECCIÓN Y ALIMENTACIÓN A 45 KV DEL TRANSFORMADOR DE SS.AA.

La aparamenta empleada para esta parte consta de:

- Seccionador giratorio tripolar de 2 columnas, apertura lateral, accionamiento manual.



| | |
|------------------------------|---------------|
| FABRICANTE | MESA |
| MODELO | SGCP 52/1.250 |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 1.250 A |
| INTENSIDAD DE CORTA DURACIÓN | 31,5 kA |
| INTENSIDAD DE CRESTA | 80 kA |
| TENSIÓN DE PRUEBAS | 110/290 kV |

- Tres bases portafusibles con tres fusibles de servicio exterior.

| | |
|--------------------|---------|
| FABRICANTE | S&G/SMD |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 3 A |

- Transformador de servicios auxiliares de servicio exterior.

| | |
|--------------------------|-----------|
| FABRICANTE | ALKARGO |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| TENSIÓN PRIMARIA | 45 kV |
| TENSIÓN SECUNDARIA | 127-230 V |
| POTENCIA | 160 kVA |
| GRUPO DE CONEXIÓN | Yzn11 |
| TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO | 4 % |
| REFRIGERACIÓN | ONAN |

- Embarrado en parque intemperie a 45 kV, formado por un cable de cobre de 120 mm², cuyos datos y ficha técnica se describen en las Tablas 9 y 10.

4.2. INSTALACIONES DE 1,3 kV

En los siguientes apartados se describe la aparamenta de la parte de corriente continua a una tensión de 1,3 kV.

GRUPO TRANSFORMADOR-RECTIFICADOR Y EQUIPOS DE FILTRADO

El proyecto de rehabilitación de la subestación supone la implantación de dos grupos transformadores-rectificadores de 6.600 kVA cada uno. Los rectificadores instalados tendrán una potencia de 6.000 kW tal y como apuntan las especificaciones técnicas de ADIF. La aparamenta empleada para los grupos transformador-rectificador está compuesta de:



- Transformador trifásico de doble devanado secundario.

| | |
|---|-----------|
| FABRICANTE | ABB |
| TENSIÓN NOMINAL | 52 kV |
| POTENCIA NOMINAL | 6.600 kVA |
| TENSIÓN SECUNDARIA | 1,3 kV |
| POTENCIA DE CADA ARROLLAMIENTO SECUNDARIO | 3.300 kVA |

- Rectificador de potencia no controlado de células de sílice, elemento normalizado por ADIF.

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| FABRICANTE | CUADRELEC |
| TENSIÓN NOMINAL | 1,3 kV |
| POTENCIA NOMINAL | 6.000 kW |
| INTENSIDAD NOMINAL | 910 A |
| CONEXIÓN | 2 puentes Graetz de diodos en serie |
| Nº DE DIODOS | 48 |
| Nº DE DIODOS RAMA | 4 |
| REFRIGERACIÓN | NATURAL |

- Bobinas de autoinducción de núcleo al aire, una por grupo, de 0,3 mH, tensión nominal de 1,3 kV, 910 A de intensidad nominal y 25 kV de intensidad de cortocircuito.
- Equipo de filtrado de armónicos a las frecuencias de 600 Hz y 1.200 Hz constituidos por:

| | |
|----------------------|----------------|
| Condensador 600 Hz | 40 μ F |
| Condensador 1.200 Hz | 10 μ F |
| Bobina 600 Hz | 1,76 mH y 60 A |
| Bobina 1.200 Hz | 1,76 mH y 20 A |

CELDA DEL SECCIONADOR DE GRUPO I Y ACOPLAMIENTO DE BARRAS ÓMNIBUS

Para el seccionamiento de la acometida de barra ómnibus procedente del rectificador del primer grupo se dispone de una cabina metálica del fabricante CUADRELEC que contiene:

- Dos seccionadores unipolares de tensión nominal 12 kV e intensidad nominal 3.150 A. Uno de ellos se emplea en el acoplamiento del grupo rectificador y el otro para el acoplamiento de barra ómnibus.
- Dos mandos mecánicos y eléctricos para el seccionador de accionamiento vertical.
- Placa de medida de tensión del grupo en corriente continua.
- Transductor de medida de intensidad de grupo en corriente continua.

El control de esta celda se realiza desde la bahía de PLC's que controlan el primer grupo rectificador.

CELDA DEL SECCIONADOR DEL GRUPO II Y ACOPLAMIENTO DE S/E MÓVIL

Los seccionadores del grupo II y del acoplamiento en corriente continua de la S/E móvil se encuentran alojados en una celda metálica del mismo fabricante y de las mismas características que la anterior. En este caso la celda contiene:

- Dos seccionadores unipolares de 12 kV de tensión nominal y 3.150 A de intensidad nominal, uno para el acoplamiento del Grupo II y el otro para el acoplamiento de la S/E móvil.
- Un mando eléctrico para seccionador de grupo de tipo interior.
- Un mando manual para el seccionador de la S/E móvil.
- Placa de medida de intensidad del grupo en corriente continua.
- Transformador de medida de intensidad del grupo en corriente continua.

El control de esta celda se realiza desde la bahía de PLC's que controla al Grupo II.

CELDA DE PROTECCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA DE SALIDA AÉREA DE FEEDER

La subestación cuenta con un total de seis salidas de feeder, cada una de ellas está equipada con los siguientes elementos ubicados en una cabina metálica extraíble de la marca CUADRELEC:

- Disyuntor extrarrápido de corriente continua.
- Transductor de intensidad
- Analizador de línea aérea de contacto para S/E de tracción en corriente continua. Se trata de un equipo utilizado en las subestaciones eléctricas de tracción con el objeto de realizar distintos ensayos y conocer la relación de tensiones o el nivel de aislamiento entre la barra Ómnibus y la línea aérea de contacto. Este tipo de equipos se encuentra asociado a un Disyuntor-Extrarrápido y se utiliza para determinar las características que debe tener dicho disyuntor en función de los resultados de los ensayos del analizador.

Está formado por dos elementos, la placa de ensayo y el autómata programable (PLC) y su conexión obedece al esquema eléctrico unifilar de la Figura 34:

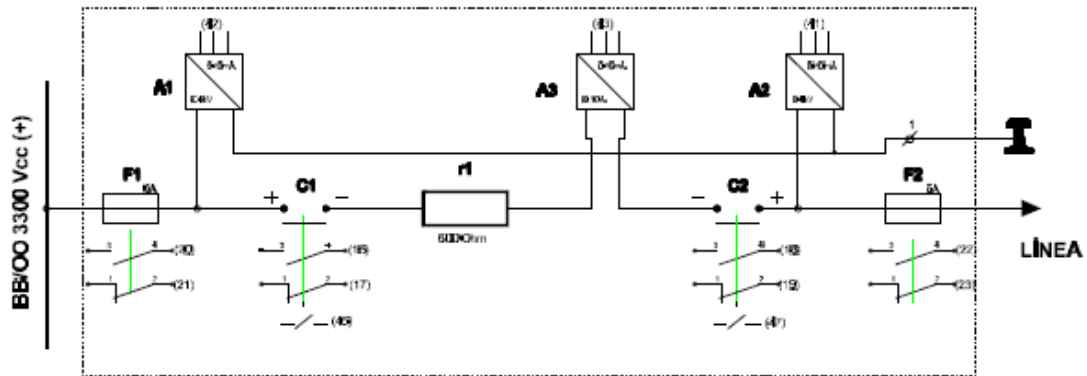


Figura 34. Esquema eléctrico unifilar de L.A.C.

El analizador de línea aérea de contacto realiza las siguientes funciones:

- Análisis del nivel de aislamiento entre L.A.C. y carril cuando la barra ómnibus está en tensión y la L.A.C. desenergizada.
- Análisis de nivel de aislamiento entre barra ómnibus y carril cuando la L.A.C. está en tensión y la barra ómnibus desenergizada.
- Análisis de los umbrales de tensión entre barra ómnibus y S/E y la que pudiera tener la L.A.C. cuando ambas están en tensión.

El conjunto de estos equipos se monta en el interior de una celda metálica extraíble dotada de un sistema de barras de colectores, trampillas de protección, pulsadores, sinóptico, amperímetro, voltímetro y avisador luminoso de fallo/bloqueo.

El control de las salidas de feeder se realiza desde el PLC correspondiente ubicado en la parte frontal superior de la cabina metálica.

El resto de equipos que se enumeran a continuación estarán ubicados en el exterior sobre el pórtico de salida de feeders. La conexión entre los equipos del pórtico y las cabinas se realiza por medio de un cable de cobre con un aislamiento de 6/10 kV y 3x1x240 mm². Este cable sale subterráneo por una canalización entubada hasta el pórtico donde subirá por un lado hasta la altura de los seccionadores de salida.

Los equipos exteriores son:

- Pararrayos tipo exterior autoválvula:

FABRICANTE
TENSIÓN NOMINAL
INTENSIDAD DE DESCARGA

GENERAL ELECTRIC / 9129CFA008
4,5 kVcc
10 kA



- Dos seccionadores unipolares de tipo exterior:

| | |
|--------------------|---------|
| FABRICANTE | MESA |
| TENSIÓN NOMINAL | 17,5 kV |
| INTENSIDAD NOMINAL | 3.150 A |

Se utilizará un seccionador de salida y otro de by-pass.

- Mando mecánico y eléctrico para seccionador vertical tipo exterior.
- Detector de tensión en barras by-pass en pórtico exterior:

| | |
|------------------------|--------------|
| FABRICANTE | INELCOM/IDCC |
| TENSIÓN NOMINAL | 3,5 kV |
| TENSIÓN DE AISLAMIENTO | 7,2 kV |

Se utilizará un detector por cada salida.



Capítulo 5

MANUAL DE OPERACIÓN.

SISTEMA DE CONTROL

AUTOMATIZADO MEDIANTE

PLCS

5.1. GENERALIDADES

Una de las principales aplicaciones de los sistemas de control automatizados mediante PLCS son las subestaciones eléctricas de tracción, donde cada vez se hace más necesaria su presencia. El uso de estos sistemas de control facilita el tratamiento y distribución de gran cantidad de señales, ya sea tanto para transmitir las a otros equipos, como para tareas de mando y automatización de los equipos ya instalados en la subestación. [29]

Incorporando a la subestación un sistema de control automatizado se consigue aumentar la seguridad, tanto del personal como de las instalaciones. Este sistema permite reducir el cableado y los relés (de señalización y los usados para el telemando), además de proporcionar una gran cantidad de información, y su posible archivo, sobre distintos aspectos de la subestación.

El sistema de control automatizado está formado por un conjunto de unidades diferentes, que pueden funcionar independientemente unas de otras, conectadas entre sí mediante un bus de comunicación común. La distribución de estas unidades se hace por bloques, comúnmente conocidos como "bahías", de tal forma que se divide la subestación en estos bloques realizando un control descentralizado.

La Figura 35 muestra un ejemplo de la división de la subestación en los distintos bloques. Se han señalado a modo de ejemplo las bahías que controlan las seis salidas de feeder, la correspondiente al transformador de servicios auxiliares o a los grupos transformadores rectificadores.

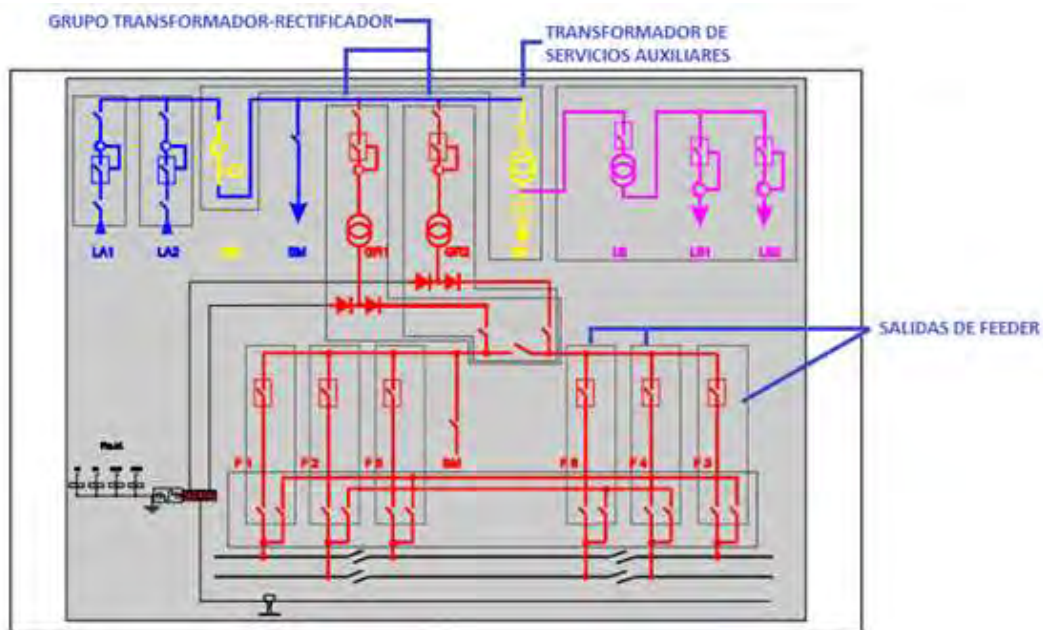


Figura 35. División de la subestación en bloques. Edición propia. [29]

Los PLCs encargados del control se distribuyen por todos los bloques de la subestación encargándose del mando-control, del enclavamiento de los equipos o de almacenar todas las alarmas y estados producidos. Así mismo, son capaces de controlar equipos específicos, como por ejemplo los relés de protección colocados en los grupos transformadores, o de realizar tareas de protección como el ensayo de línea.

Estos PLCs están formados por una unidad central programable (CPU) a la que se añaden distintos módulos adicionales según la aplicación del autómatas y de las señales a tratar. En la Figura 36 se muestra un ejemplo de la configuración de uno de estos PLCs:

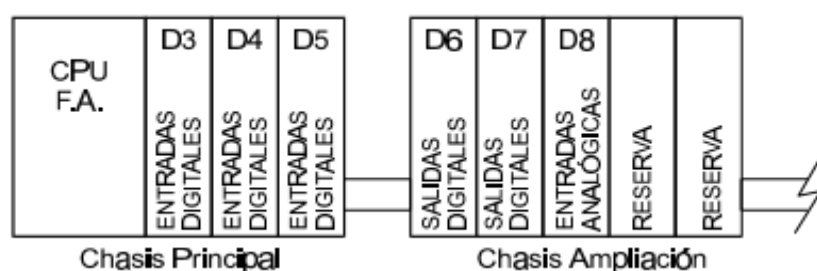


Figura 36. Elementos del PLC

En la Figura 36 se distingue entre chasis principal, que es el que aloja la CPU y chasis de ampliación, donde se alojan los módulos especiales en función de la aplicación.

En este capítulo se estudiarán en profundidad algunos de los bloques en los que se divide la subestación para realizar el control automatizado.

5.2. PLCs LÍNEA DE ACOMETIDA

El bloque eléctrico de Línea de Acometida estará compuesto por diferentes elementos dependiendo de si el bloque se encuentra en carros extraíbles o en parque exterior, celdas de mampostería o cabinas. En el caso de la subestación de estudio, este bloque se encuentra en parque exterior por lo que estará compuesto por: [30]

- Un seccionador tripolar de entrada con accionamiento eléctrico
- Un interruptor tripolar de AT con mando eléctrico
- Un seccionador tripolar de salida de accionamiento manual
- Transformadores de protección y de tensión a la entrada de la línea
- Seccionador tripolar de autoválvulas y autoválvulas

La Figura 37 muestra el esquema unifilar para la "línea de acometida 1" con interruptor en celda de mampostería:

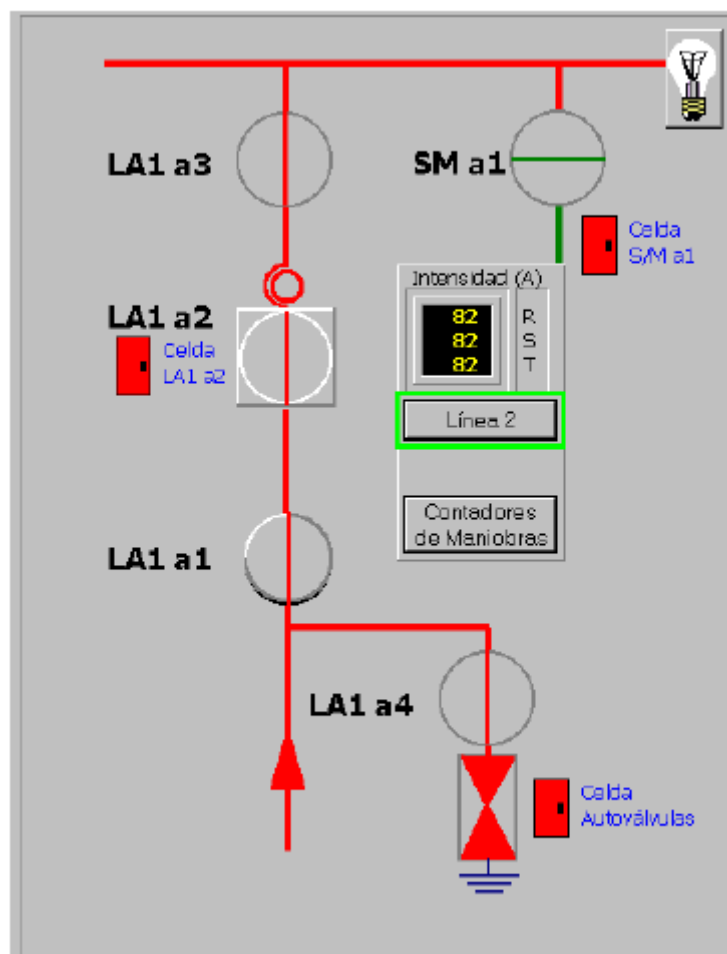


Figura 37. Esquema unifilar de línea de acometida

Para el mando y control del bloque de Línea de Acometida se dispone de:

- Conmutadores de mando para cada elemento del bloque, colocados en el frente de celda desde donde se pueden maniobrar y visualizar el estado de los distintos aparatos.
- Puesto de control centralizado (PCC). Con el PCC, ratón, teclado y un sistema de comunicación hombre-máquina es posible realizar el control total del bloque y realizar las maniobras de aquellos aparatos que dispongan de mando eléctrico.
- Puesto de control a distancia.

5.2.1. MANIOBRAS

Se distinguen tres modos de funcionamiento:

1. MODO MANUAL

La característica principal de este modo de funcionamiento es que en él no se producen acciones de aislamiento, conmutación o reenganches automáticos, excepto cuando se incumplan las condiciones de seguridad de las zonas de trabajo.

Es obligatorio trabajar en este modo de funcionamiento cuando en el bloque de Líneas de Acometida, o en las líneas que convergen en él, se realicen trabajos en tensión.

Las maniobras permitidas en este modo son:

- Seccionador tripolar de entrada: ejecuta órdenes voluntarias de cierre o apertura mediante los correspondientes enclavamientos eléctricos y mecánicos.
- Interruptor tripolar de AT: ejecuta órdenes voluntarias de desconexión y conexión. La desconexión de este interruptor es provocada por la actuación de las protecciones.
- Maniobras en el seccionador tripolar de salida.

2. MODO SEMIAUTOMÁTICO

En este modo de funcionamiento se producen las mismas acciones que en el manual y además la generación de procesos de reenganche automático.

3. MODO AUTOMÁTICO

En este modo de funcionamiento se producen las mismas acciones que en el manual y además la generación de procesos de aislamiento, conmutación y reenganche automático.

Mientras se esté realizando cualquier proceso automático se generará una señalización denominada "Automatismo en curso".

- Un interruptor automático tripolar
- Resto de elementos auxiliares de la subestación como por ejemplo: cargadores-baterías y convertidores.

Dentro del bloque de Servicios Auxiliares también está incluido el bloqueo eléctrico de medida de AT, que está compuesto por un grupo de transformadores-convertidores que miden la potencia activa trifásica, la tensión entre fases en AT y la intensidad. Este bloque incluye también una celda donde se colocan los transformadores de medida.

En la Figura 39 se muestra el esquema unifilar de este bloque de control:

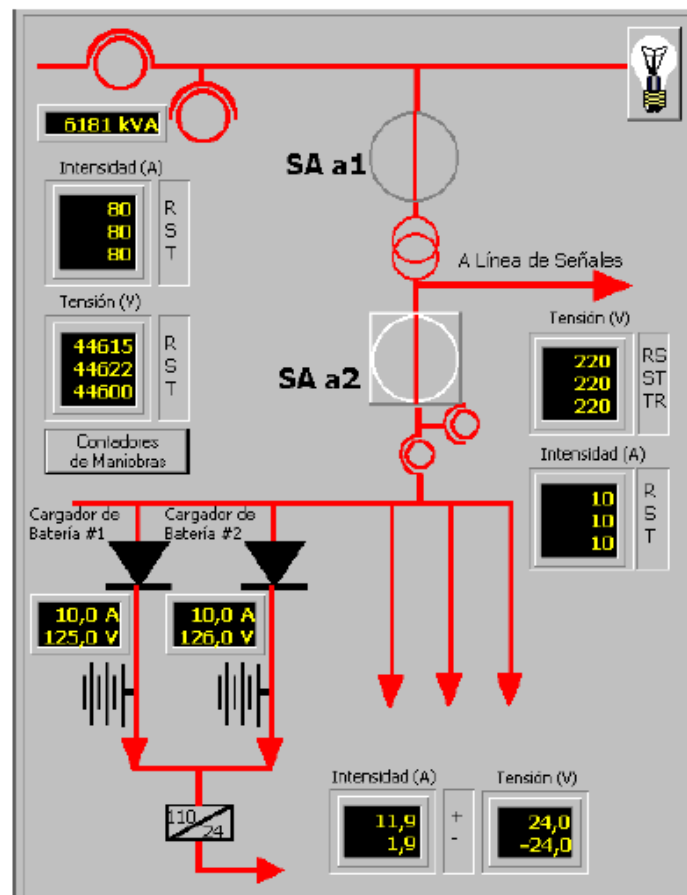


Figura 39. Esquema unifilar del bloque de SS.AA. [31]

Al igual que para el bloque de Líneas de Acometida, para el control de este bloque se dispone también de los conmutadores de mando de cada elemento del bloque, el puesto de control centralizado (PCC) y el puesto de control a distancia.

5.3.1. MANIOBRAS

1. MODO MANUAL

Al igual que en el bloque anterior, en el modo de funcionamiento manual no se producen reenganches, acciones de aislamiento o conmutación automáticas, a menos que se incumplan las condiciones de seguridad de las zonas de trabajo. Es obligatorio trabajar en este modo de funcionamiento cuando en el bloque en cuestión, o en las líneas que en él convergen se estén haciendo trabajos en tensión.

Las maniobras que se llevan a cabo en el modo manual para este bloque son:

- Seccionador de entrada: podrá maniobrase cuando se abra el interruptor de servicios auxiliares.
- Interruptor BT: podrá abrirse o cerrarse ,cuando se cumplan las condiciones de permisividad, mediante enclavamientos mecánicos y eléctricos.

2. MODO SEMIAUTOMÁTICO

En este modo se realizan las mismas acciones que en el manual y además los procesos de reengache automático.

3. MODO AUTOMÁTICO

Para este bloque de control las maniobras que pueden realizarse en el modo automático son las mismas que en el semiautomático.

5.3.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS

El bloque de equipos de medida de energía también se encuentra en el exterior del edificio y en la Figura 40 se muestra el esquema de los enclavamientos en dicho bloque:



Figura 40. Esquema de enclavamientos de equipos de medida de energía [31]

En la Figura 40 se distingue una única zona de trabajo: zona de trabajo 3 o ZT3. Esta zona de trabajo permite realizar el mantenimiento y conservación de los transformadores de medida (de tensión e intensidad). Para acceder a esta zona de trabajo y gestionarla se utilizan las llaves 5,6,7,8,20,21 y 22.

El esquema de enclavamientos para el bloque de servicios auxiliares en parque exterior es el mostrado en la Figura 41:

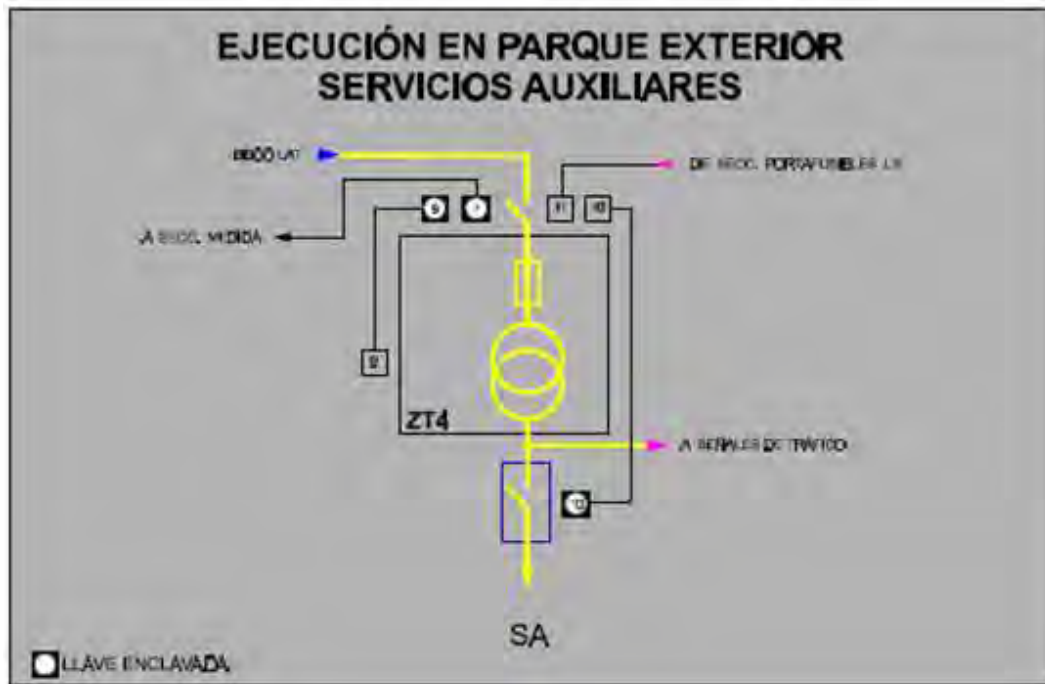


Figura 41. Esquema de enclavamientos para SS.AA.

En este bloque se distingue la Zona de Trabajo 4 (ZT4) que permite realizar el mantenimiento y la conservación del transformador de servicios auxiliares y de los fusibles de AT que lo protegen. Para acceder a esta zona de trabajo y gestionarla se utilizan las cerraduras 10,11 y 9.

5.4. PLCs GRUPO TRANSFORMADOR RECTIFICADOR

Otro de los bloques en los que se divide el control automatizado de la subestación es el formado por cada uno de los grupos transformadores-rectificadores. Este bloque está compuesto por: [32]

- Interruptor tripolar de AT con sus correspondientes transformadores de protección
- Transformador de potencia
- Rectificador con sus protecciones y filtros
- Seccionador monopolar de salida con accionamiento eléctrico (y sus dispositivos de maniobra)

- Seccionador monopolar de unión de barras ómnibus con accionamiento eléctrico
- Seccionador monopolar de subestación eléctrica móvil con accionamiento manual

En la Figura 42 se muestra el esquema unifilar para la bahía de un grupo transformador rectificador:

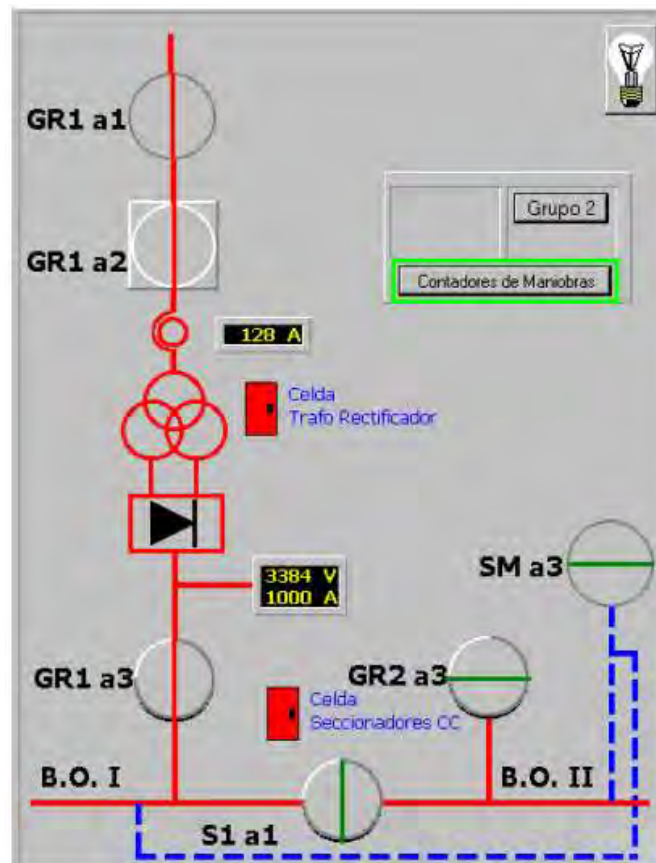


Figura 42. Esquema unifilar del bloque transformador-rectificador [32]

Al igual que en los bloques anteriores, para el control y mando se dispone de los distintos conmutadores de mando de cada elemento, el puesto de control centralizado (PCC) y el puesto de control a distancia.

5.4.1. MANIOBRAS

1. MODO MANUAL

Como ya se ha dicho en bloques anteriores, en este modo de funcionamiento no se producen acciones de aislamiento, conmutación o reenganches automáticos, excepto cuando se incumplen las condiciones de seguridad de las zonas de trabajo.

Se debe trabajar en este modo de funcionamiento cuando en este bloque, o en las líneas que a él convergen, se realicen trabajos en tensión.

En el modo de funcionamiento manual se realizan las órdenes voluntarias de los aparatos y las desconexiones provocadas por las protecciones. Las maniobras permitidas para este bloque son:

- Maniobras sobre el seccionador de entrada
- Desconexión y conexión del interruptor
- Apertura y cierre del seccionador de salida
- Apertura y cierre del seccionador de unión de barras ómnibus
- Apertura y cierre del seccionador de salida del otro grupo transformador-rectificador.

2. MODO SEMIAUTOMÁTICO

En este modo de funcionamiento, además de las acciones permitidas en el modo manual puede realizarse la generación de procesos de reenganche automático.

3. MODO AUTOMÁTICO

En el modo automático se producen las mismas acciones que en el manual y además la generación de procesos de aislamiento, conmutación y reenganche automático.

Además, para este bloque, se generan maniobras de los seccionadores de salida de los dos grupos transformadores-rectificadores, del seccionador de barras ómnibus y del interruptor, siempre que se den las condiciones para la realización de los procesos automáticos.

Si el PLC de este bloque no detecta la presencia de otro bloque eléctrico en el bus de comunicaciones desconectará su interruptor. Además, no ejecutará ninguna maniobra sobre el resto de sus aparatos hasta que no vuelva a estar activo el bus de comunicaciones.

5.4.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS

En la Figura 43 se muestra el esquema de los enclavamientos del grupo transformador-rectificador. Los transformadores de ambos grupos se encuentran fuera del edificio de la subestación y los rectificadores dentro.

En la Figura 43 se diferencian dos zonas de trabajo. Por un lado, la zona de trabajo ZT8 permite el mantenimiento del interruptor tripolar del Grupo Transformador-Rectificador, de sus transformadores de protección y demás elementos auxiliares. El acceso a esta zona de trabajo se realiza mediante la CERRADURA 29.

Por otro lado, la zona de trabajo ZT9 permite el mantenimiento del Grupo Transformador-Rectificador, su bobina, su filtro de armónicos y demás elementos auxiliares. El acceso a esta zona de trabajo se realiza mediante la CERRADURA 30.

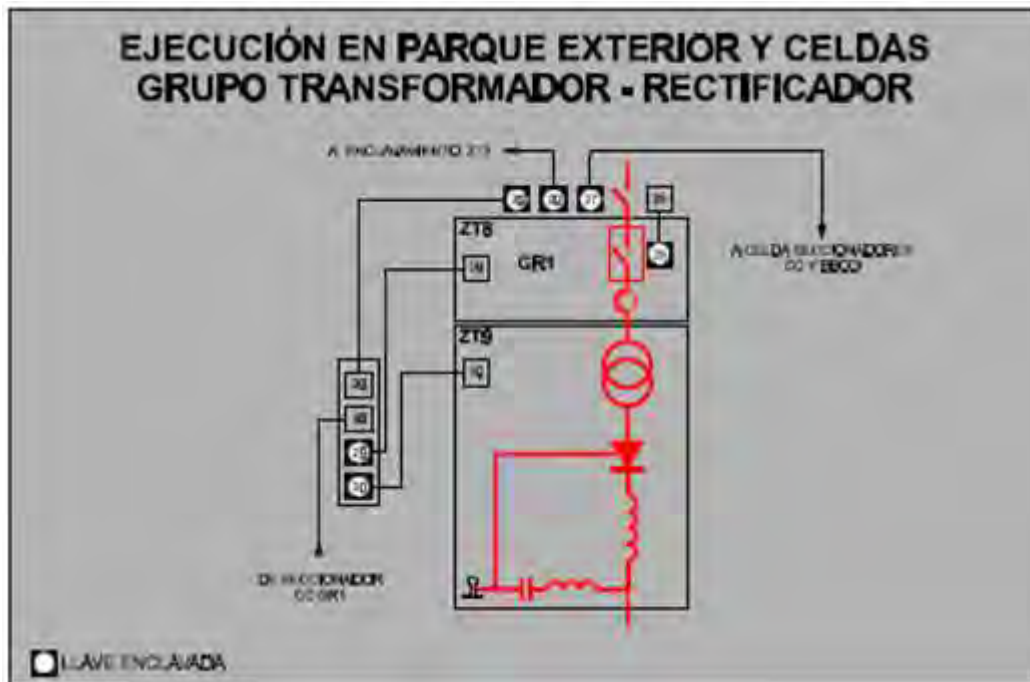


Figura 43. Enclavamientos mecánicos grupo transformador-rectificador [32]

En la Figura 43 se distinguen otras llaves, como por ejemplo la 20, que permite el acceso a la Zona de Trabajo 3, correspondiente al bloque de Servicios Auxiliares y de Medida.

5.5. PLCs SALIDA DE FEEDER

El bloque eléctrico de salida de feeder (habrá un total de doce) está compuesto por: [33]

- Celda con enclavamiento electro-mecánico: contiene un seccionador bipolar de entrada con accionamiento manual y un disyuntor-extrarrápido de mando eléctrico.
- Pórtico de seccionadores de salida de feeder: contiene el seccionador de salida de feeder y el seccionador By-Pass, que es un seccionador monopolar de unión con una barra by-pass.

En la Figura 44 se muestra el esquema unifilar del bloque en una celda extraíble:

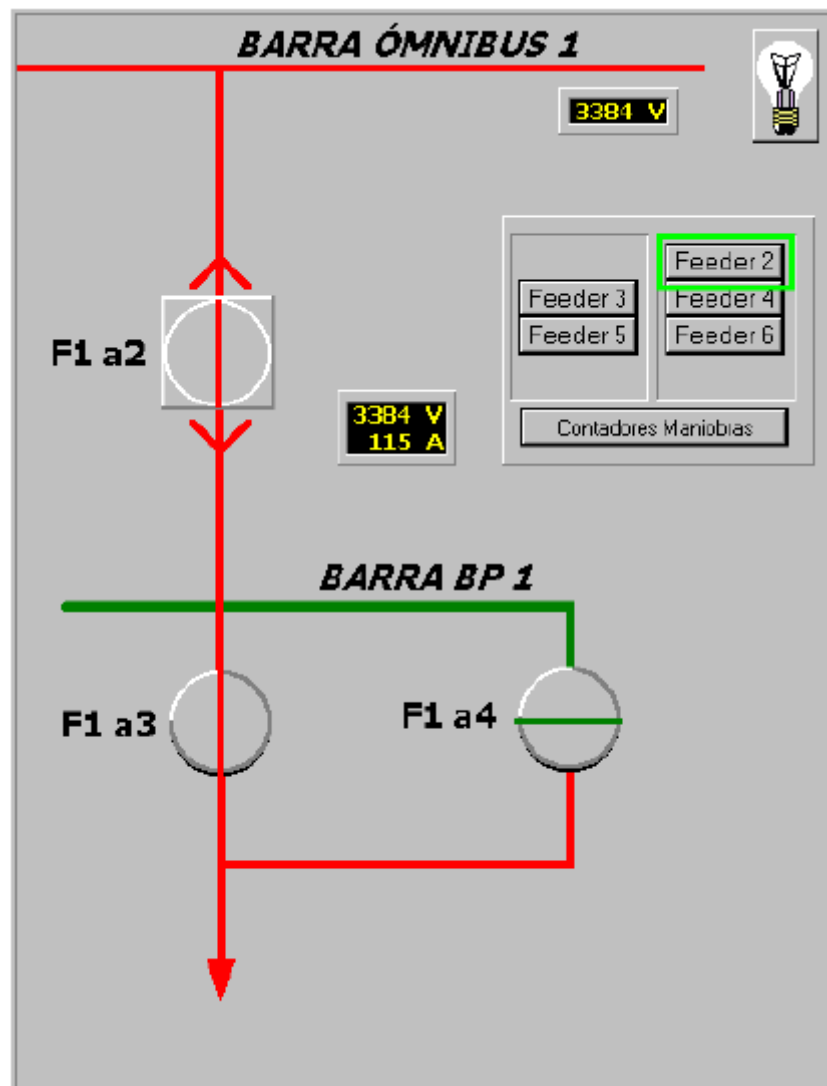


Figura 44. Esquema unifilar del bloque de salida de feeder [33]

Al igual que en el resto de bloques analizados, para el mando y control del bloque de salida de feeder se dispone de los conmutadores de cada elemento, el puesto de control centralizado y el puesto de control a distancia.

5.5.1. MANIOBRAS

1. MODO MANUAL

De nuevo cabe destacar que en este modo de funcionamiento no se producen acciones de aislamiento, conmutación o reenganches automáticos, excepto cuando se incumplen las condiciones de seguridad de las zonas de trabajo.

Se debe trabajar en este modo de funcionamiento cuando en este bloque, o en las líneas que a él convergen, se realicen trabajos en tensión.



En el modo de funcionamiento manual se realizan las órdenes voluntarias de los aparatos y las desconexiones provocadas por las protecciones. Las maniobras permitidas para este bloque son:

- Maniobras sobre el seccionador bipolar de entrada
- Desconexión y conexión del disyuntor-extrarrápido
- Apertura y cierre del seccionador de salida de feeder (El PLC del bloque de "Pórtico de Seccionadores" también tiene control sobre este seccionador)
- Apertura y cierre del seccionador de by-pass. (El PLC del bloque de "Pórtico de Seccionadores" también tiene control sobre este seccionador). Cuando dos Feeders se conectan en paralelo a través de sus seccionadores by-pass, la conexión se llama "Conexión en by-pass de los Feeders"

2. MODO SEMIAUTOMÁTICO

En este modo de funcionamiento, además de las acciones permitidas en el modo manual puede realizarse la generación de procesos de reenganche automático.

3. MODO AUTOMÁTICO

En el modo automático se producen las mismas acciones que en el manual y además la generación de procesos de aislamiento, conmutación y reenganche automático.

Al igual que ocurría en el bloque transformador-rectificador, si el PLC de este bloque no detecta la presencia de otro bloque eléctrico en el bus de comunicaciones desconectará su interruptor. Además, no ejecutará ninguna maniobra sobre el resto de sus aparatos hasta que no vuelva a estar activo en el bus de comunicaciones.

5.5.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS

En la Figura 45 se muestra el esquema de enclavamientos para las salidas de feeder alojadas en celdas extraíbles (en el interior del edificio de la subestación):

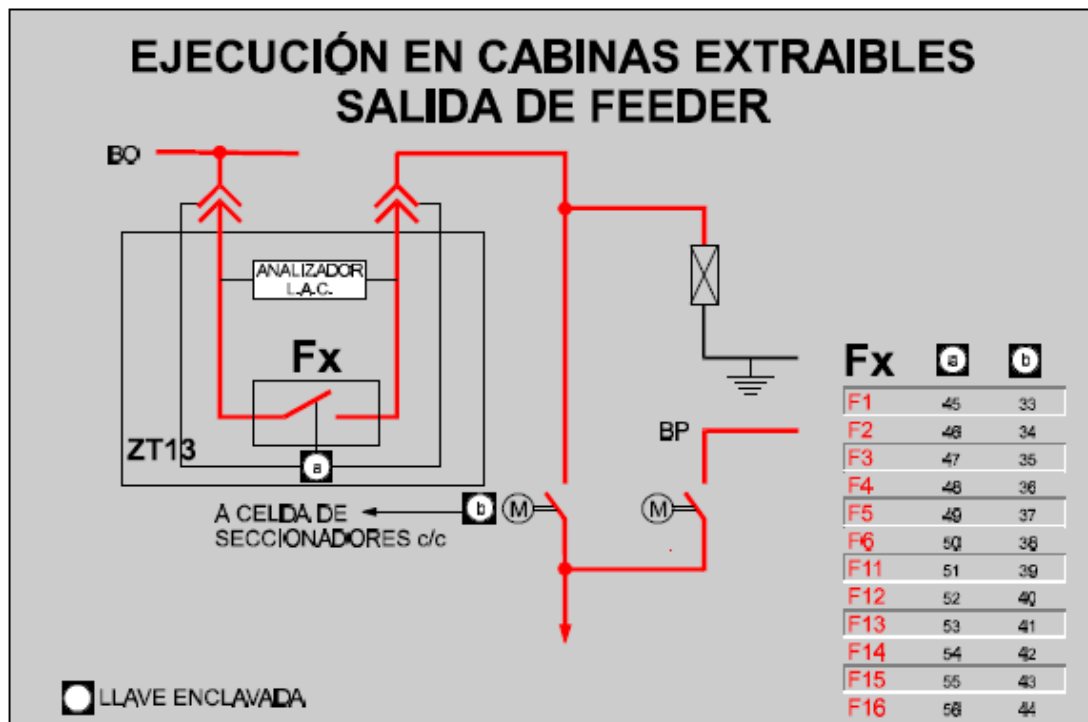


Figura 45. Enclavamientos mecánicos. Bloque de salida de feeder [33]

En el esquema de la Figura 45 se distingue la zona de trabajo 13 (ZT13). Esta zona de trabajo permite el mantenimiento del disyuntor del analizador de Línea Aérea de Contacto. Mediante la cerradura "a" se permite el enclavamiento del disyuntor-extrarrápido.

Además la cerradura "b" enclava el seccionador de salida de feeder. Las cerraduras de este bloque son las mismas que las que aparecerán en la sección de enclavamientos del bloque "Pórtico de Seccionadores".

5.6. PLCs PÓRTICO DE SECCIONADORES

Este bloque eléctrico se encuentra a la intemperie, fuera del edificio de la subestación y conectado directamente con el bloque de salida de feeders, lo que hace que algunas maniobras sean compartidas (o redundantes) [34]. La Figura 46 muestra un esquema unifilar del bloque:

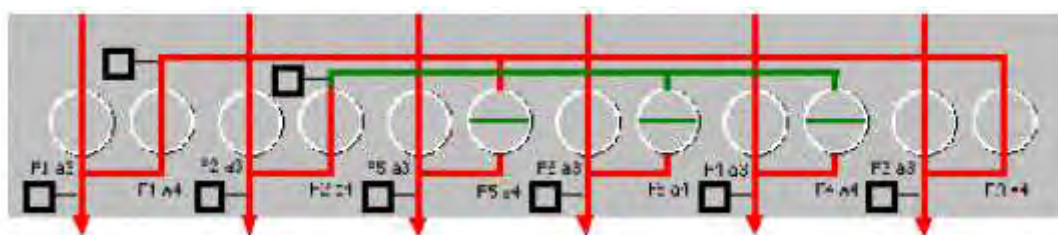


Figura 46. Esquema unifilar del bloque de pórtico de seccionadores [34]



La bahía del pórtico de seccionadores se compone de:

- Seccionadores monopolares de salida de feeder y by-pass de todos los feeders de la subestación
- Detectores de tensión en cada salida de feeder
- Detectores de tensión en cada Barra By-Pass
- Relé de protección contra defectos a masa en el pórtico de salida de feeders

Para el mando y control del bloque se cuenta con el puesto de control centralizado y el puesto de control a distancia.

5.6.1. MANIOBRAS

1. MODO MANUAL

Las condiciones de funcionamiento del modo manual son las mismas que para los anteriores bloques. Y de nuevo cabe destacar que en este modo sólo se realizan las órdenes voluntarias de los aparatos y las provocadas por las protecciones.

Las maniobras permitidas para este bloque son:

- Apertura y cierre del seccionador de salida de feeder
- Apertura y cierre del seccionador de by-pass

Estas maniobras ya fueron mencionadas en el bloque de salida de feeders y es que el control por parte de estos dos bloques es redundante.

2. MODO SEMIAUTOMÁTICO

En este modo de funcionamiento, además de las acciones permitidas en el modo manual puede realizarse la generación de procesos de reenganche automático.

3. MODO AUTOMÁTICO

En el modo automático se producen las mismas acciones que en el manual y además la generación de procesos de aislamiento, conmutación y reenganche automático.

5.6.2. ENCLAVAMIENTOS MECÁNICOS

En la Figura 47 se muestra el esquema de los enclavamientos para este bloque:

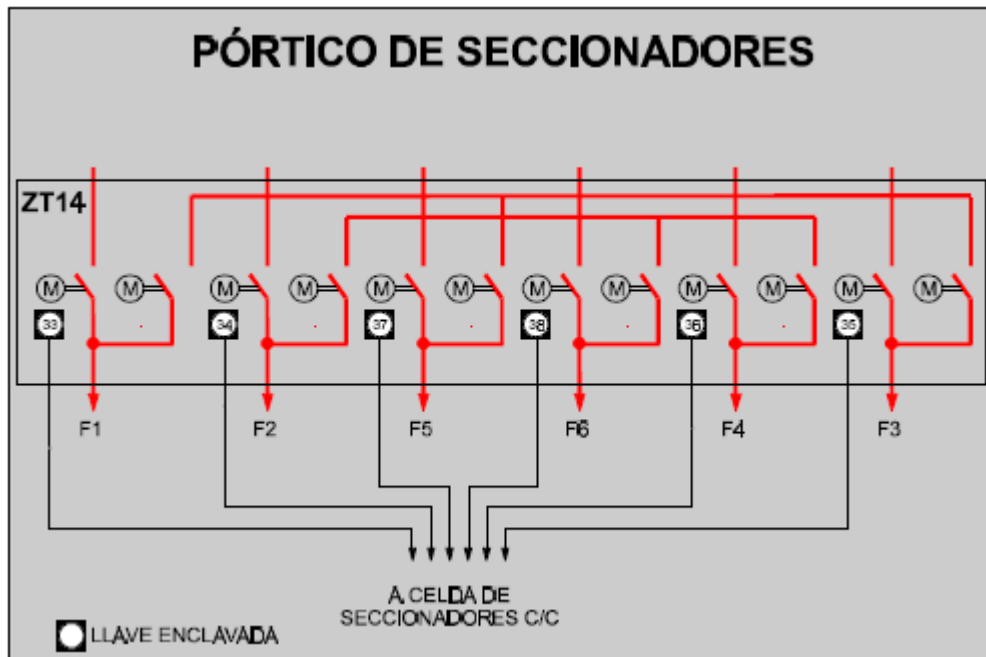


Figura 47. Enclavamientos mecánicos del pórtico de seccionadores [34]

En este caso se distingue una única zona de trabajo, la ZT4, que permite el mantenimiento y conservación de cada uno de los seccionadores de salida de feeder, los seccionadores by-pass, detectores de tensión en salidas de feeder y barras by-pass y demás elementos de protección.

5.7. PLCs PUESTO DE CONTROL CENTRALIZADO

En todos los bloques anteriores se ha mencionado el Puesto de Control Centralizado como un medio para el control y mando. Pues bien, este bloque también conocido como PCC está dedicado al control del resto de bahías mediante el diálogo hombre-máquina. Desde este bloque se podrán realizar todas las tareas de supervisión, mando y control de la subestación de tracción.

El PCC está formado por un PC Industrial con capacidad de almacenamiento de datos y conexión a impresora. Por medio de distintas pantallas permite visualizar el estado de cada una de las bahías y acceder a ellas. [35]

La comunicación con el operador se basa en el uso de sinópticos, que son cada una de las figuras de los enclavamientos de los bloques anteriores. El uso de estos sinópticos permite, por un lado, tener una visión global de la subestación y por otro conocer la evolución de distintas variables en el tiempo. Además será posible dar órdenes a seccionadores, disyuntores, etc.

Toda la información recogida por el PCC y por los PLC's de cada bahía, permite realizar informes y establecer estadísticas y tendencias de las distintas variables.

El Puesto de Control Centralizado está formado por los siguientes componentes:

- Ordenador Industrial
- Sistema operativo
- Software de supervisión
- Bus de Comunicaciones

En la Figura 48 se muestra un esquema de la topología del Bus de Comunicaciones:

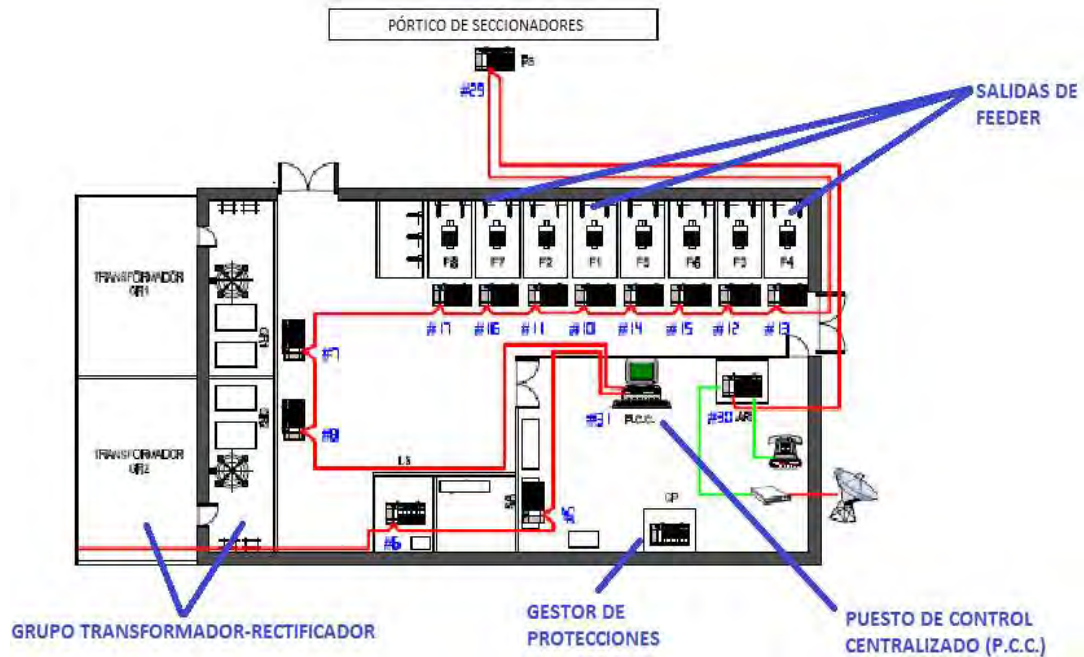


Figura 48. Topología del Bus de comunicaciones. Edición propia.

En la Figura 48 se observa como el Bus de Comunicaciones (línea roja) comunica cada una de las bahías en las que está dividida la subestación.

Capítulo 6

PRESUPUESTO

En el desarrollo de este capítulo sólo se han tenido en cuenta los "aspectos eléctricos", por lo que no se profundiza en el presupuesto de temas como demoliciones o cualquier tipo de obra civil.

6.1. INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN

| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|-----|---|------|-----|----------------------------|-------------------|
| 1.1 | Cuadro general de alumbrado y fuerza en baja tensión, con todos los aparatos de mando y protección de la subestación | 1 | ud | 423,49 | 423,49 |
| 1.2 | Punto de luz de emergencia de 6 W con aparato autónomo, incluso sujeción, tubo y cableado | 4 | ud | 89,88 | 359,52 |
| 1.3 | Punto de luz para intemperie de 125 W. Luminaria con tapa de cristal opalizada, conjunto de goma, prensaestopas de nylon y toma de tierra. Incluso soporte de brazo mural y parte proporcional de tubo, cable y sujeción, totalmente colocada | 6 | ud | 136,56 | 819,36 |
| 1.4 | Punto de luz de emergencia para intemperie de 100 W, luminaria y tapa con junta de goma, incluso soporte de brazo mural y parte proporcional de tubo y cableado | 4 | ud | 136,56 | 819,36 |
| 1.5 | Pantalla fluorescente de 2x36 W, cebadores, cableado, tubos y parte proporcional de tubo y cableado totalmente colocada | 30 | ud | 100,80 | 3.024 |



| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|-----|---|------|-----|----------------------------|-------------------|
| 1.6 | Punto luz de 125 W para socorro, base, cesta de protección y tapa con junta de goma, incluso parte proporcional de tubo y cableado | 12 | ud | 154,44 | 1.853,28 |
| 1.7 | Interruptor conmutador completamente colocado, incluso cajeadado y recibo, parte proporcional de tubería, cableado y caja de registro y conexión. | 22 | ud | 38,28 | 842,16 |
| 1.8 | Enchufe de 16 A con toma de tierra en caja PVC, conexionado, incluso cajeadado, recibo, cableado tubería y conexión. | 7 | ud | 30,94 | 216,58 |
| 1.9 | Proyectores asimétricos para lámparas de descarga, con equipo incorporado, de 250 W para iluminación del parque exterior. Totalmente montado y conexionado sobre estructura metálica existente. | 2 | ud | 1.049,27 | 2.098,54 |

TOTAL CAPITULO 1:10.183,17 €



6.2. INSTALACIONES DE POTENCIA

| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|-----|--|------|-----|----------------------------|-------------------|
| 2.1 | Desmontaje y traslado a almacén, designado por el director de las obras, del aparillaje eléctrico de la subestación no reciclable o sujeto a traslado. Incluye: mandos eléctricos entradas de línea, trafos de intensidad de protección y medida, seccionador manual con fusibles del trazo de servicios auxiliares, trafos y rectificadores de potencia, bobinas de amortiguamiento, equipos de filtrado, seccionadores monopolares de feederes, subida de positivos, armarios de control, repartidor de comunicaciones, selectivo y seccionador de acoplamiento de s/e móvil, 8 seccionadores de feederes y by-pass con sus mandos. Se incluye, además, manos de obra de desmontaje y traslado, la carga, transporte y descarga en el almacén. | 1 | ud | 4.848 | 4.848 |
| 2.2 | Acondicionamiento y limpieza del aparillaje reutilizable del parque de intemperie. Incluye pararrayos con sus seccionadores y mandos, seccionadores de entrada con sus mandos eléctricos, seccionadores de barras de mando manual, disyuntores automáticos de línea y grupos, | 1 | ud | 9.088,51 | 9.088,51 |



| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|-----|--|------|-----|----------------------------|-------------------|
| | trafos de medida de tensión, seccionador y mando de la S/E móvil, trafo de servicios auxiliares y seccionadores con mando de alimentación a grupos, aisladores, embarrado y crucetas de suspensión de feederes. Se incluye también el desmontaje, transporte, carga y descarga de los equipos cuyo acondicionamiento y limpieza no se realice estando instalado, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje y traslado de los materiales acopiados del parque de intemperie. | | | | |
| 2.4 | Enclavamiento mecánico de toda la subestación incluido la adaptación de aparamenta. Totalmente montados y conexicionados. | 1 | | 5.641,16 | 5.641,16 |
| 2.5 | Entrada de línea a 45 kV, totalmente montada y conexcionada, incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. Incluido material acopiado. | 2 | | 1.910,02 | 3.820,04 |
| 2.6 | Equipo de medida a 45 kV. Totalmente montada y conexcionada, incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. Incluido material | 1 | | 381,22 | 381,22 |



| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|------|--|------|-----|----------------------------|-------------------|
| | acopiado. | | | | |
| 2.7 | Alimentación a los servicios auxiliares de la subestación. Totalmente montada y conexionada, incluidos transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. | 1 | | 9.164,10 | 9.164,10 |
| 2.8 | Grupo transformador-rectificador y filtros de continua en una subestación con dos grupos de 6600 kVA y 45 kV. Totalmente montada y conexionada incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministros de material auxiliar. Incluidos montaje y transporte de rectificadores NP+1, bobina y filtros. | 2 | | 18.376,25 | 36.752,5 |
| 2.9 | Celda de seccionadores de grupo y acoplamiento de barra Ómnibus. Totalmente montada y conexionada, incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. | 1 | ud | 11.754,81 | 11.754,81 |
| 2.10 | Celda de salida de feeders sin equipar, se incluye el transporte y la carga y descarga en el almacén. | 2 | ud | 478,65 | 957,3 |
| 2.11 | Salida aérea de feeders en corriente continua en la subestación. Totalmente | 12 | ud | 15.752,89 | 189.034,68 |



| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|------|--|------|-----|----------------------------|-------------------|
| | montada y conexionada, incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. Incluido material acopiado. | | | | |
| 2.12 | Alimentación a los nuevos centros de transformación, señalización y seccionamiento de líneas de señalización a 2200 V, bajo envolvente metálica y servicio de interior. Incluido la carga, descarga y el transporte. Montaje y puesta en servicio. | 1 | ud | 1.917,85 | 1.917,85 |
| 2.13 | Celda de alimentación a la línea de señalización (con 2 salidas) en la subestación. Totalmente montada y conexionada, incluido transporte carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministro de material auxiliar de montaje. | 2 | ud | 3.026,34 | 6.052,68 |
| 2.14 | Red de tierras y masas de la subestación totalmente montada y conexionada. Incluido transporte, carga y descarga de materiales, medios auxiliares y suministros de material auxiliar de montaje. | 1 | ud | 19.794,86 | 19.794,86 |
| 2.15 | Paneles para el mando y control de las llegadas de línea, grupos transformadores-rectificadores, armario de relés intermedios de telemando. Todos los elementos totalmente montados y conexionados. Incluye montaje | 1 | ud | 49.193,44 | 49.193,44 |



| Nº | Concepto | Med. | Ud. | Precio Unitario (€/Unidad) | Importe Total (€) |
|------|--|------|-----|----------------------------|-------------------|
| | y material acopiado. | | | | |
| 2.16 | Suministro y montaje de equipo de arrastre entre disyuntores extrarrápidos de S/E colaterales. Sistema para 8 arrastres, montado en armario y con alimentación, conectado y en servicio. | 1 | ud | 16.197,59 | 16.197,59 |
| 2.17 | Gestor de protecciones (PLC) tipo renfe, para el control de las puestas a tierra en la subestación, desconexiones automáticas de extrarrápidos de feeders, recepción de arrastres, fallo de transmisión entre subestaciones y puestas a tierra de catenaria. Se incluyen en el precio software, conexión y puesta en servicio. | 1 | ud | 5.778,07 | 5.778,07 |
| 2.18 | Adaptación de la estación remota de telecontrol para S/E. Totalmente montada, conectada al sistema de telecontrol y en servicio. | 1 | ud | 615,68 | 615,68 |
| 2.19 | Adaptación de equipo de telemando para puesto central. Totalmente cableado, conexionado y puesto en servicio. | 1 | ud | 615,68 | 615,68 |
| 2.19 | Mobiliario para el personal de la subestación. Incluido transporte carga y descarga de materiales. | 1 | ud | 880,28 | 880,28 |

TOTAL CAPITULO 2:385.150,09 €



8.3. RESUMEN

| | |
|--|---------------------|
| CAPITULO 1 | 10.183,17 € |
| CAPITULO 2 | 385.150,09 € |
| TOTAL | 395.333,26 € |
| GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL [15%]..... | 59.299,99 € |
| TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA | 454.633,25 € |
| IVA [21%]..... | 95.472,98 € |
| PRESUPUESTO BASE LICITACIÓN | 550.106,23 € |

Capítulo 7

PLANIFICACIÓN

En este capítulo se pretende mostrar la planificación llevada a cabo para el desarrollo del proyecto. En dicha planificación se muestra el conjunto de capítulos que conforman este trabajo fin de grado y el tiempo empleado en la realización de cada uno. Dicho proyecto fue asignado el día 7 de Febrero de 2014 y comenzó a realizarse el 17 de Febrero del mismo año. Se debe tener en cuenta que ciertas tareas, como por ejemplo el Capítulo 3 de Cálculos, se prolongaron más en el tiempo pues su realización coincidió con el periodo de evaluación del segundo cuatrimestre.

Para mostrar el comienzo y final de cada uno de los capítulos o tareas se ha empleado un diagrama de Gantt, representado en la Figura 49. El conjunto de las tareas se incluye en la Tabla 30.

Tabla 30. Planificación de tareas

| TRABAJOS | FECHA DE INICIO | DURACIÓN (días) | FECHA DE FIN |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| INTRODUCCIÓN | 17/02/2014 | 7 | 24/02/2014 |
| ESTADO DEL ARTE | 24/02/2014 | 27 | 23/03/2014 |
| CÁLCULOS | 24/03/2014 | 59 | 22/05/2014 |
| DEFINICIÓN DE APARAMENTA | 22/05/2014 | 15 | 06/06/2014 |
| MANUAL DE OPERACIÓN | 06/06/2014 | 28 | 04/07/2014 |
| PRESUPUESTO | 04/07/2014 | 10 | 14/07/2014 |
| CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS | 14/07/2014 | 3 | 17/07/2014 |
| PLANOS DE LA SUBESTACIÓN | 17/07/2014 | 7 | 24/07/2014 |
| REVISIÓN Y CORRECCIÓN | 24/07/2014 | 40 | 02/09/2014 |

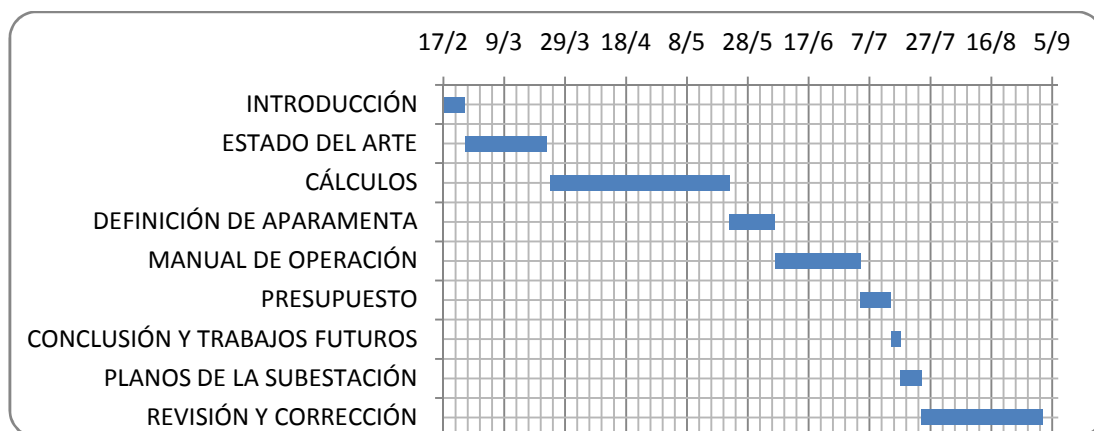


Figura 49. Diagrama de Gantt



Capítulo 8

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Terminado este Trabajo Fin de Grado y alcanzados los objetivos marcados desde su comienzo, se pretende exponer en este capítulo, de una forma resumida, las conclusiones del mismo.

En primer lugar, a lo largo de este documento se ha podido comprobar cómo el sector ferroviario está en continuo desarrollo. Analizando primero sus comienzos y después los proyectos más innovadores conocidos hasta ahora se comprueba la gran evolución que ha experimentado este sector en los últimos años y cómo las nuevas vías de investigación apuntan a que seguirá haciéndolo en los años siguientes.

De igual forma, se ha podido comprobar cómo el transporte ferroviario tiene una gran repercusión en la economía del país y cómo su desarrollo afecta a la calidad de vida de las personas, siempre mejorándola.

En cuanto a la electrificación ferroviaria, se han analizado los distintos modos que existen, llegando a la conclusión de que el objetivo no es encontrar el más eficaz en general, sino el que mejor se adapte a las condiciones con las que se trabajen y a la aplicación en la que se use.

Sobre los trabajos futuros puede decirse que las nuevas líneas de investigación apuntan a un continuo desarrollo del sector ferroviario siempre desde un punto de vista sostenible, intentando aumentar el aprovechamiento de energía. Por ello, en el caso de seguir trabajando sobre este Trabajo Fin de Grado, sería de gran utilidad profundizar más en las posibilidades que ofrece el aprovechamiento de la energía en la tracción ferroviaria.

Además, otros aspectos que podrían servir para una futura ampliación de este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Mayor profundización en el estudio de la electrónica de potencia utilizada en la subestación, como por ejemplo en la etapa de filtrado necesaria tras las rectificación.
- Realizar diversos estudios sobre cómo mejorar las protecciones utilizadas incorporando variantes a las que se han expuesto.
- Ampliar la definición de aparamenta, realizando una explicación más exhaustiva de los distintos elementos y sus posibles modificaciones.



- Profundizar en el estudio de armónicos, en su presencia y efecto en el funcionamiento de la subestación de tracción.

Por último, una vez completado este Trabajo de rehabilitación de una subestación en corriente continua, sus aspectos más fundamentales podrían servir de guía para un proyecto de mejora similar en corriente alterna.



Bibliografía

1. **Moreno, Jesús.** *"Prehistoria del ferrocarril"* Vía libre. 1983.
2. **Wais, Francisco.** *"Historia de los ferrocarriles españoles"*. Editorial Nacional. 1974.
3. **Cendreo Agenjo, Benjamín; Truyols Mateu, Sebastián.** *"El transporte: aspectos y tipología"*. Delta Publicaciones. 2008.
4. **Real Academia Española.** *"Diccionario de la lengua española"*. Espasa Calpe. 2001.
5. http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml. Febrero de 2014
6. http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/madrid_sevilla/historia_madrid-sevilla.shtml. Febrero de 2014
7. **Kiessling; Pushmann; Schmieder; Vega.** *"Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados"*. Siemens. 2008.
8. **TECNORAIL CO.** *"Sistemas de alimentación a la tracción eléctrica"*. 2008.
9. **Martínez Acevedo, J.** *"La electrificación ferroviaria"*. Gestor de infraestructuras ferroviarias. 2002.
10. **Rábanos Santamaría, Carlos.** *"El potencial de la tecnología ferroviaria española"*. ADIF. 2013.
11. http://www.adif.es/es_ES/doc/fichas/Folleto_ferrolinera.pdf. Marzo de 2014
12. <http://www.abc.es/madrid/20140224/abcp-metrolinera-llega-madridmetro-recarga-20140224.html>. Febrero de 2014.
13. <https://www.metromadrid.es/es/comunicacion/prensa/2014/Marzo/noticia04.html>. Marzo de 2014.
14. <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=11445&cs=infr>. Marzo de 2014
15. http://www.ingeteam.com/es-es/traccion-ferroviaria/sistemas-de-recuperacion-de-energia/p18_36_57/ingeber.aspx. Marzo de 2014
16. **Martínez, José Conrado.** *"Seminario permanente en tecnologías energéticas"* Universidad Pontificia de Comillas. 2010.

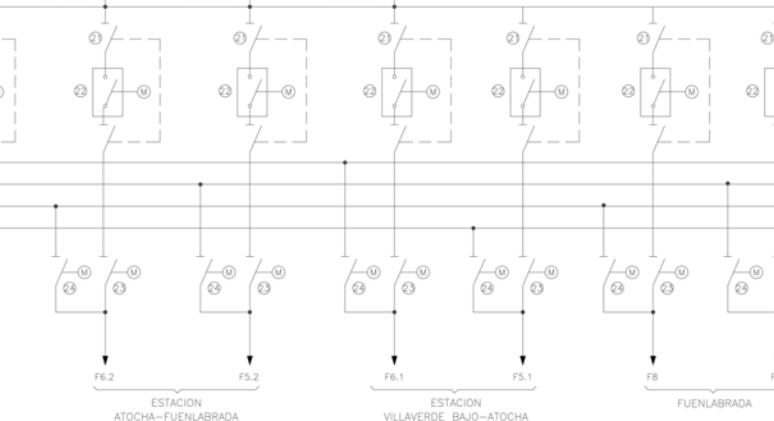
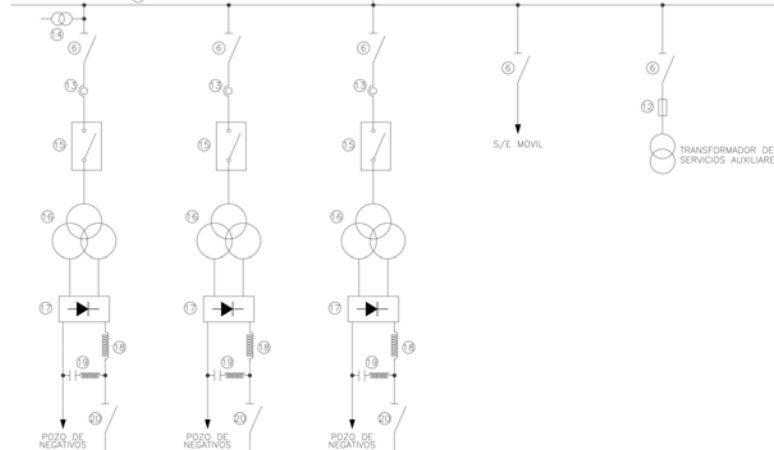
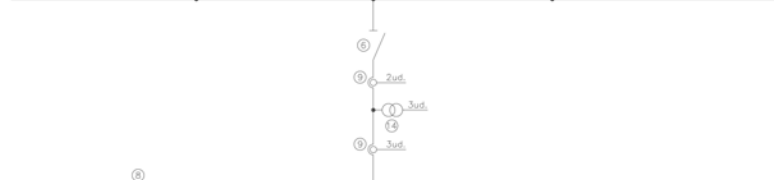


17. <http://www.vialibre-ffe.com/pdf/6514TRANVIASINCATENARIACAF.pdf>.
Febrero de 2014.
18. <http://www.elmundo.es/elmundo/2010/02/22/paisvasco/1266830656.html>.
Febrero de 2014.
19. http://noticias.lainformacion.com/ciencia-y-tecnologia/tecnologia-general/el-tranvia-supera-con-exito-las-pruebas-de-circulacion-sin-catenaria_8lVO3PdezUChJeW7HbfjM/. Marzo de 2014
20. **Sanz Feito, Javier.** *"Máquinas eléctricas"*. Pearson Educación. 2002.
21. <http://www.arcelomital.com>. Abril de 2014
22. Instrucción Técnica Complementaria MIE-RAT 13.
23. IEEE No.80 Guide for Safety in AC Substations Grounding.
24. Instrucción Técnica MIE-RAT 1.
25. Catálogo de pararrayos INAEL.
26. Norma UNE-EN 60099-4.
27. Recomendación para la selección y utilización del pararrayos CEI 99-5.
28. Instrucción Técnica MIE-RAT 12.
29. ET 03.359.109.0. *"Sistema de control automatizado mediante PLC'S. Generalidades"*. 1997.
30. ET 03.359.109.0. *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Líneas de Acometida"*. 1997
31. ET 03.359.109.0 *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Servicios Auxiliares de Medida"*. 1997.
32. ET 03.359.109.0 *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Grupo transformador-rectificador"*. 1997.
33. ET 03.359.109.0 *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Salida de feeder"*. 1997.
34. ET 03.359.109.0 *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Pórtico de seccionadores"*.
35. ET 03.359.109.0 *"Sistema de Control Automatizado mediante PLC's. Puesto de Control Centralizado"*.



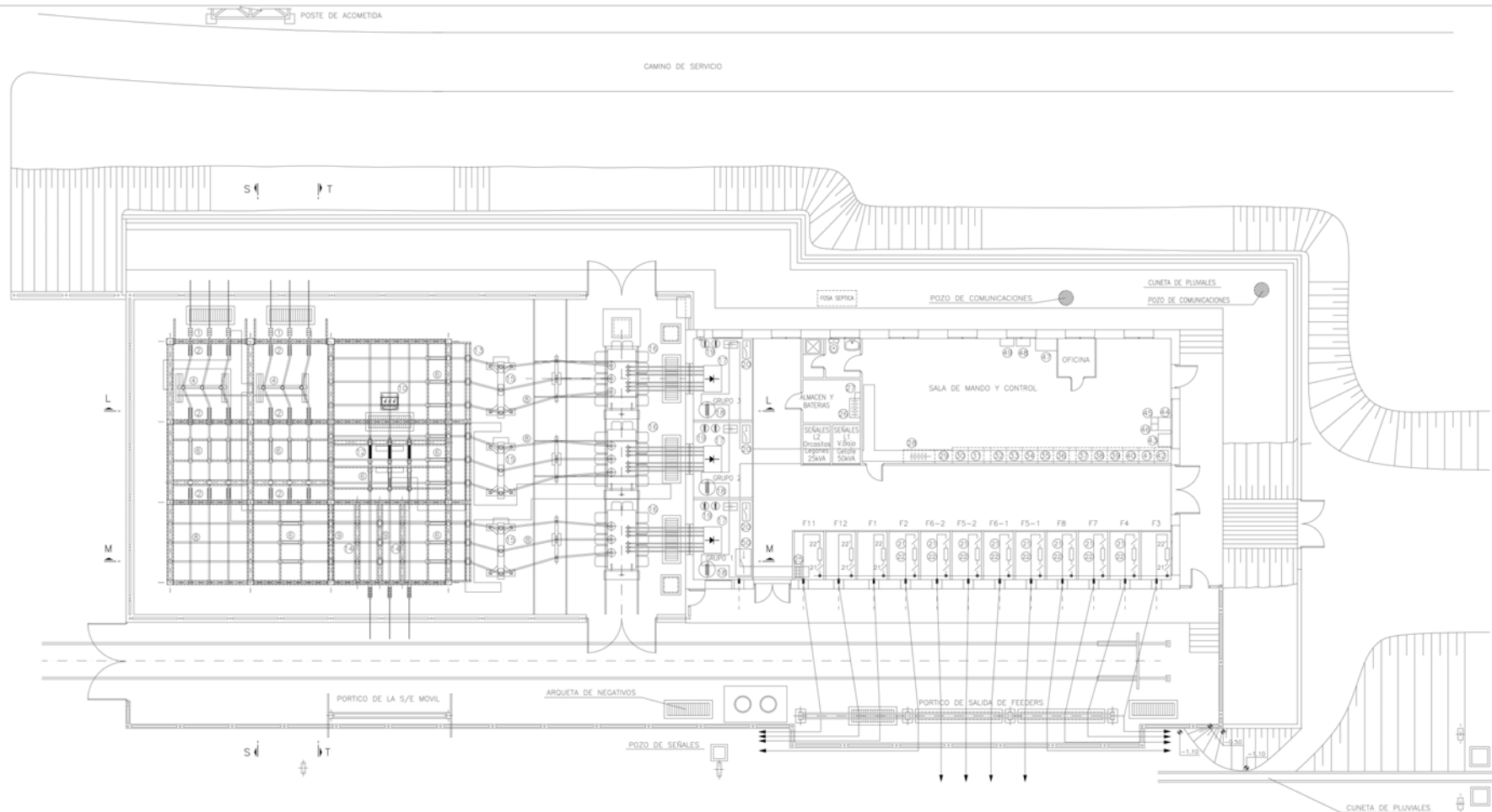
-
36. Curso de instalaciones eléctricas. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales.
37. Hoja de características de conductores desnudos.

ANEXO. PLANOS



| Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION |
|----|--|--------------------------|
| 1 | CADENAS AISLADORES | SI (1) |
| 2 | ANILADOR RIGIDO | SI (1) |
| 3 | SECCIONADOR MOTORIZADO MESA AE20 | SI (4) |
| 4 | INTERRUPTOR 150DEL HPF ₂ 409 | SI (4) |
| 5 | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 125/5A | NO |
| 6 | SECCIONADOR MANUAL GARDI A2H52 | SI (4) |
| 7 | AUTOVALVULAS 454V ASEA A2H52 | SI (4) |
| 8 | EMBARRADO TUBULAR RIGIDO | SI (1) |
| 9 | TRANSFORMADORES INTENSIDAD MEDIDA 150/5A | NO |
| 10 | TRAFO S/A DIESTRE DHI 150/52 150kVA | SI (4) |
| 11 | CRUCETA SUSPENSION 4 FEEDERS | SI (4) |
| 12 | SECCIONADOR MANUAL CON FUSIBLES A.T. GARDI DV6 10 5A | NO |
| 13 | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 60/5A | NO |
| 14 | TRAFO TENSION MEDIDA ARTECHE 45000/110V | SI (4) |
| 15 | INTERRUPTOR AUTOMATICO TEYCA HU-52 | SI (4) |
| 16 | TRAFO POTENCIA DIESTRE DHR 3300/52000 | NO |
| 17 | RECTIFICADOR SPI 3000kW | NO |
| 18 | BOBINA ARA 0.6mH 910A | NO |
| 19 | EQUIPO DE FILTRADO 600Hz Y 1200Hz | NO |
| 20 | SECCIONADOR C.C. IBERICA APARELLAJE IA-79 | NO |
| 21 | SECCIONADOR MANUAL BIPOLAR MESA S2-12/2500 | NO |
| 22 | SECCIONADOR MONOPOLAR | NO |
| 23 | EXTRARRAPIDO APENA WS E/H | SI (4) |
| 24 | EXTRARRAPIDO UR26-44 | SI (3) |
| 25 | EXTRARRAPIDO ANSALDO | SI (4) |
| 26 | SECCIONADOR SALIDA FEEDER | SI (4) FEEDERS 1,3,11,12 |
| 27 | SECCIONADOR BY-PASS | SI (4) FEEDERS 1,3,11,12 |

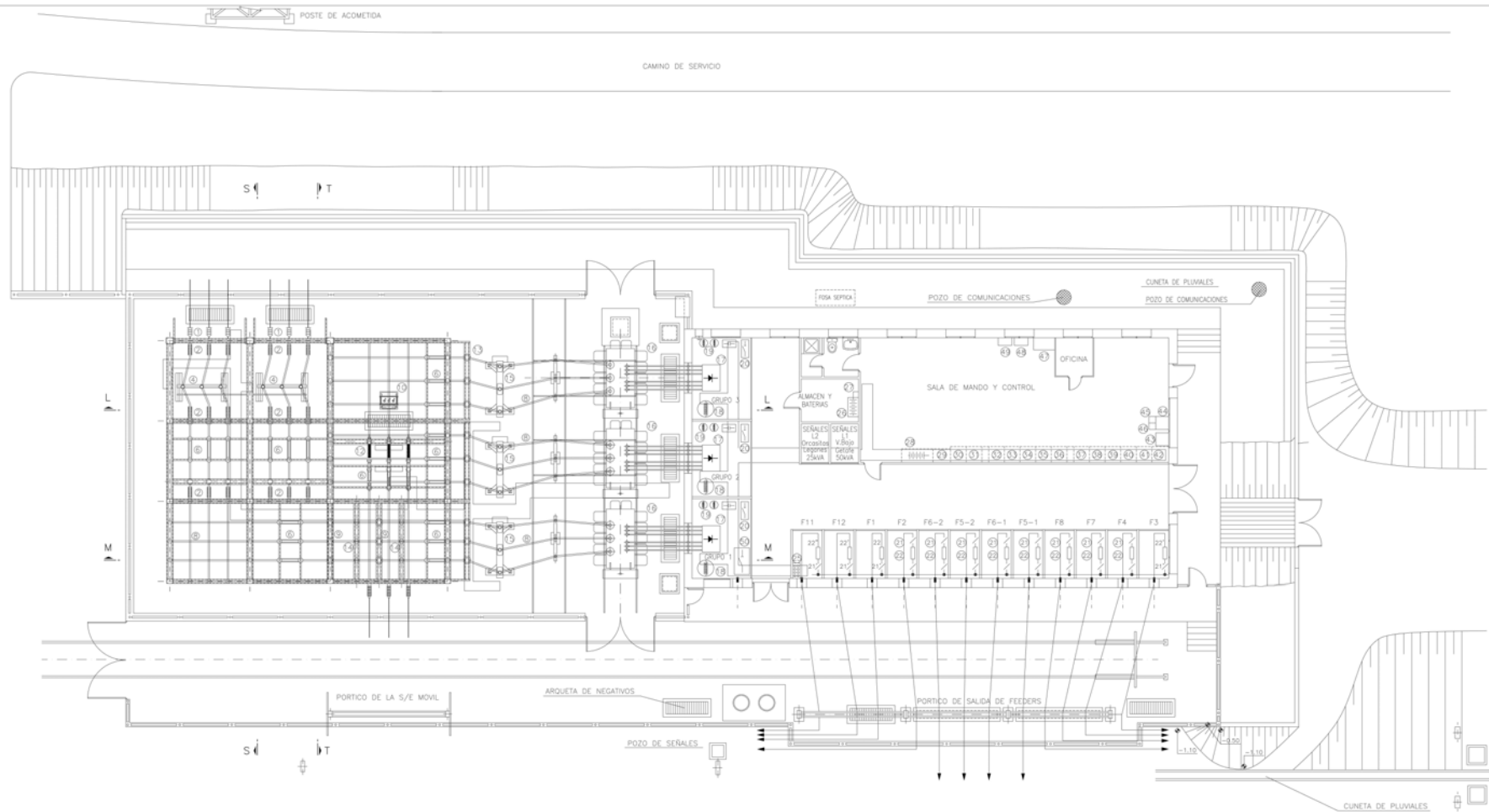
| | | |
|--------|-------------------|---|
| FECHA | 14/07/2014 |  Universidad Carlos III de Madrid |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | |
| ESCOLA | TITULO DEL PLANO | Nº de plano 2.1 |
| S/E | ESQUEMA UNIFILAR | Nº de hoja 1 de 1 |



| Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION | Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION | Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION |
|------|--|---------------|------|---|-------------------------|------|--|---------------|
| (1) | CADENAS AISLADORES | SI (1) | (19) | EQUIPO DE FILTRADO 60Hz Y 1200Hz | NO | (26) | ARMARIO CONTROL GRUPO 2 | NO |
| (2) | ASLADOR RIGIDO | SI (1) | (20) | SECCIONADOR C.C. IBERICA APARELLAE IA-79 | NO | (27) | ARMARIO CONTROL GRUPO 3 | NO |
| (3) | SECCIONADOR MOTORIZADO MESA AE20 | SI (4) | (21) | SECCIONADOR MANUAL BIPOLAR MESA SI2-12/2500 | NO | (28) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F6-2 Y F2 | NO |
| (4) | INTERRUPTOR ISODEL HPF6 409 | SI (4) | (22) | SECCIONADOR MONOPOLAR | NO | (29) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F6-1 Y F5-2 | NO |
| (5) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 125/5A | NO | (23) | EXTRARRAPIDO APENA WS E/H | SI (4) | (30) | ARMARIO CONTROL FEEDERS FB Y F5-1 | NO |
| (6) | SECCIONADOR MANUAL GARDI A2H52 | SI (4) | (24) | EXTRARRAPIDO UR26-44 | SI (3) | (31) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F4 Y F7 | NO |
| (7) | AUTOVALVULAS 45KV ASEA A2H52 | SI (4) | (25) | EXTRARRAPIDO ANSALDO | SI (4) | (32) | ARMARIO CONTROL SEÑALES | NO |
| (8) | EMBARRADO TUBULAR RIGIDO | SI (1) | (26) | SECCIONADOR SALIDA FEEDER | SI (4) FEEDERS 1.1.1.12 | (33) | ARMARIO SERVICIOS AUXILIARES | NO |
| (9) | TRANSFORMADORES INTENSIDAD MEDIDA 150/5A | NO | (27) | SECCIONADOR BY-PASS | SI (4) FEEDERS 1.1.1.12 | (34) | ARMARIO RELES INTERMEDIOS | NO |
| (10) | TRAFO S/A DISTRIBUCION 150/52 150kVA | SI (4) | (28) | SUBIDA POSITIVOS | NO | (35) | TELEMANDEO SANCO | SI (4) |
| (11) | CRUCETA SUSPENSION 4 FEEDERS | SI (4) | (29) | BATERIA ANTIGUA 60A/A + CARGADOR | SI (4) | (36) | ARRASTRES | SI (4) |
| (12) | SECCIONADOR MANUAL CON FUSIBLES A.T. GARDI DV6 10 SA | NO | (30) | CONMUTADOR BATERIAS | SI (4) | (37) | SAI TELEMANDO | SI (4) |
| (13) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 60/5A | NO | (31) | BATERIA PRINCIPAL 65 A/A + CARGADOR 25A | SI (4) | (38) | SAI ARRASTRES | SI (4) |
| (14) | TRAFO TENSION MEDIDA ARTECHE 45000/110V | SI (4) | (32) | ARMARIO DETECTOR DE TENSION | SI (4) | (39) | REPARTIDOR COMUNICACIONES | NO |
| (15) | INTERRUPTOR AUTOMATICO TEYCA HU-52 | SI (4) | (33) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F12 Y F11 | NO | (40) | SELECTIVO | NO |
| (16) | TRAFO POTENCIA DISTRIBUCION DHR 3300/52000 | NO | (34) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F3 Y F1 | NO | (41) | SAI | SI |
| (17) | RECTIFICADOR SPI 3000kW | NO | (35) | ARMARIO CONTROL LINEAS 1 Y 2 | NO | (42) | SECCIONADOR ACOPLAMIENTO S/E MOVIL EN C.C. | NO |
| (18) | BOBINA ARA 0.6mH 910A | NO | (36) | ARMARIO CONTROL GRUPO 1 | NO | | | |

- (1) SOLO LOS QUE SE ENCUENTRAN EN BUEN ESTADO PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA
(2) SE CAMBIA LA CHIMENEA POR UNA MAYOR TIPO 64
(3) TRAS PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA

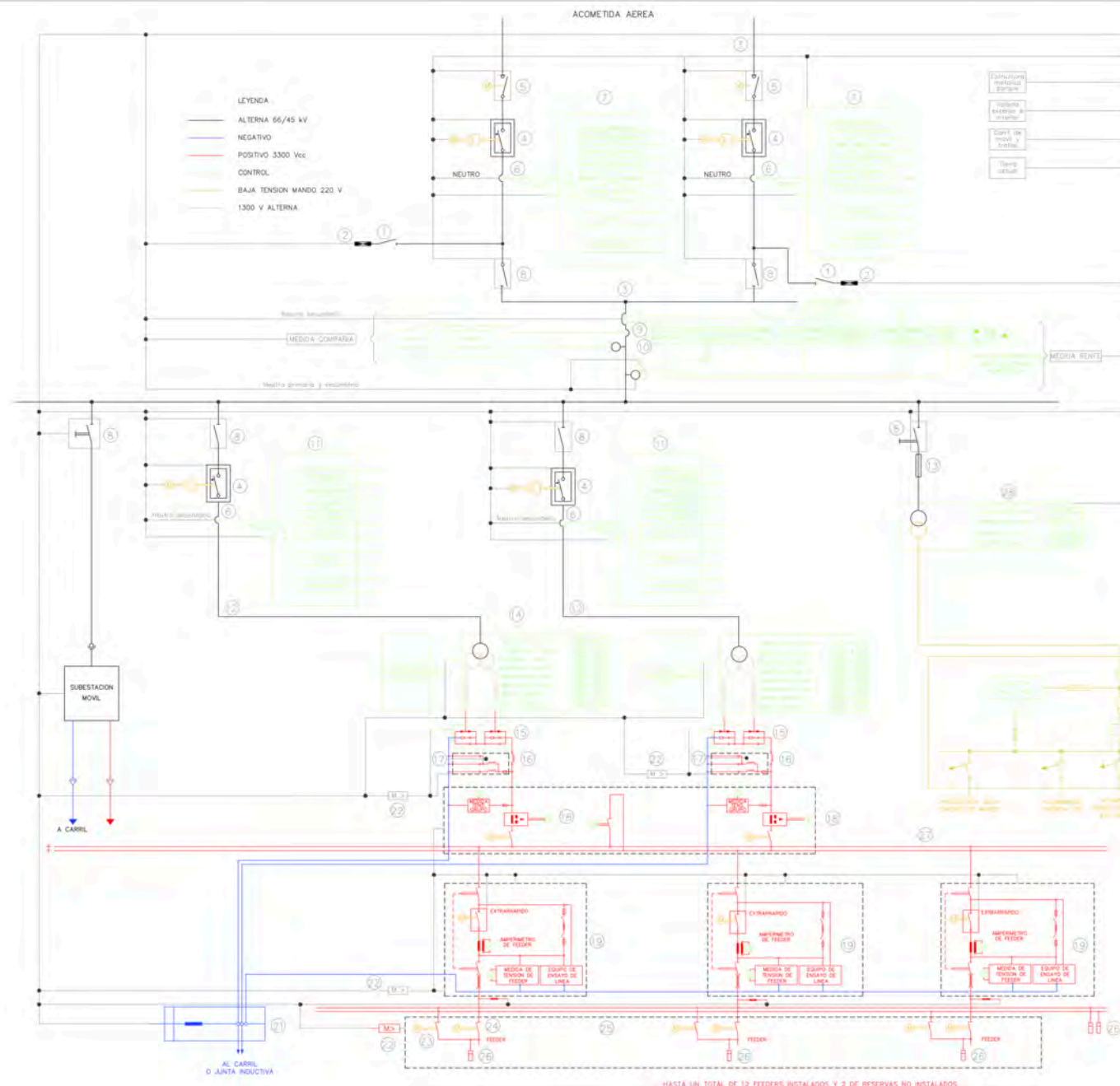
| | | | |
|--------|--------------------------------|-------------|--------|
| FECHA | 24/07/2014 | | |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | | |
| ESCALA | TITULO DEL PLANO | | |
| S/E | SITUACION INICIAL DE LA PLANTA | | |
| | | Nº de plano | 22 |
| | | Nº de hoja | 1 de 1 |



| Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION | Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION | Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION |
|------|--|---------------|------|---|-------------------------|------|--|---------------|
| (1) | CADENAS AISLADORES | SI (1) | (19) | EQUIPO DE FILTRADO 60Hz Y 1200Hz | NO | (26) | ARMARIO CONTROL GRUPO 2 | NO |
| (2) | ASLADOR RIGIDO | SI (1) | (20) | SECCIONADOR C.C. IBERICA APARELLAJE IA-79 | NO | (27) | ARMARIO CONTROL GRUPO 3 | NO |
| (3) | SECCIONADOR MOTORIZADO MESA AE20 | SI (4) | (21) | SECCIONADOR MANUAL BIPOLAR MESA SI2-12/2500 | NO | (28) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F6-2 Y F2 | NO |
| (4) | INTERRUPTOR ISODEL HPF6 409 | SI (4) | (22) | SECCIONADOR MONOPOLAR | NO | (29) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F6-1 Y F5-2 | NO |
| (5) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 125/5A | NO | (23) | EXTRARRAPIDO APENA WS E/H | SI (4) | (30) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F8 Y F5-1 | NO |
| (6) | SECCIONADOR MANUAL GARDI A2H52 | SI (4) | (24) | EXTRARRAPIDO UR26-44 | SI (3) | (31) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F4 Y F7 | NO |
| (7) | AUTOVALVULAS 45KV ASEA A2H52 | SI (4) | (25) | EXTRARRAPIDO ANSALDO | SI (4) | (32) | ARMARIO CONTROL SEÑALES | NO |
| (8) | EMBARRADO TUBULAR RIGIDO | SI (1) | (26) | SECCIONADOR SALIDA FEEDER | SI (4) FEEDERS 1.1.1.12 | (33) | ARMARIO SERVICIOS AUXILIARES | NO |
| (9) | TRANSFORMADORES INTENSIDAD MEDIDA 150/5A | NO | (27) | SECCIONADOR BY-PASS | SI (4) FEEDERS 1.1.1.12 | (34) | ARMARIO RELES INTERMEDIOS | NO |
| (10) | TRAFO S/A DISTRIBUCION 150/52 150kVA | SI (4) | (28) | SUBIDA POSITIVOS | NO | (35) | TELEMANEJO SANCO | SI (4) |
| (11) | CRUCETA SUSPENSION 4 FEEDERS | SI (4) | (29) | BATERIA ANTIGUA 60A/A + CARGADOR | SI (4) | (36) | ARRASTRES | SI (4) |
| (12) | SECCIONADOR MANUAL CON FUSIBLES A.T. GARDI DV6 10 SA | NO | (30) | CONMUTADOR BATERIAS | SI (4) | (37) | SAI TELEMANEJO | SI (4) |
| (13) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION ARTECHE CX G52 60/5A | NO | (31) | BATERIA PRINCIPAL 85 A/A + CARGADOR 25A | SI (4) | (38) | SAI ARRASTRES | SI (4) |
| (14) | TRAFO TENSION MEDIDA ARTECHE 45000/110V | SI (4) | (32) | ARMARIO DETECTOR DE TENSION | SI (4) | (39) | REPARTIDOR COMUNICACIONES | NO |
| (15) | INTERRUPTOR AUTOMATICO TEYCA HU-52 | SI (4) | (33) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F12 Y F11 | NO | (40) | SELECTIVO | NO |
| (16) | TRAFO POTENCIA DISTRIBUCION DHR 3300/52000 | NO | (34) | ARMARIO CONTROL FEEDERS F3 Y F1 | NO | (41) | SAI | SI |
| (17) | RECTIFICADOR SPI 3000kW | NO | (35) | ARMARIO CONTROL LINEAS 1 Y 2 | NO | (42) | SECCIONADOR ACOPLAMIENTO S/E MOVIL EN C.C. | NO |
| (18) | BOBINA ARA 0.6mH 910A | NO | (36) | ARMARIO CONTROL GRUPO 1 | NO | | | |

- (1) SOLO LOS QUE SE ENCUENTRAN EN BUEN ESTADO PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA
(2) SE CAMBIA LA CHIMENEA POR UNA MAYOR TIPO 64
(4) TRAS PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA

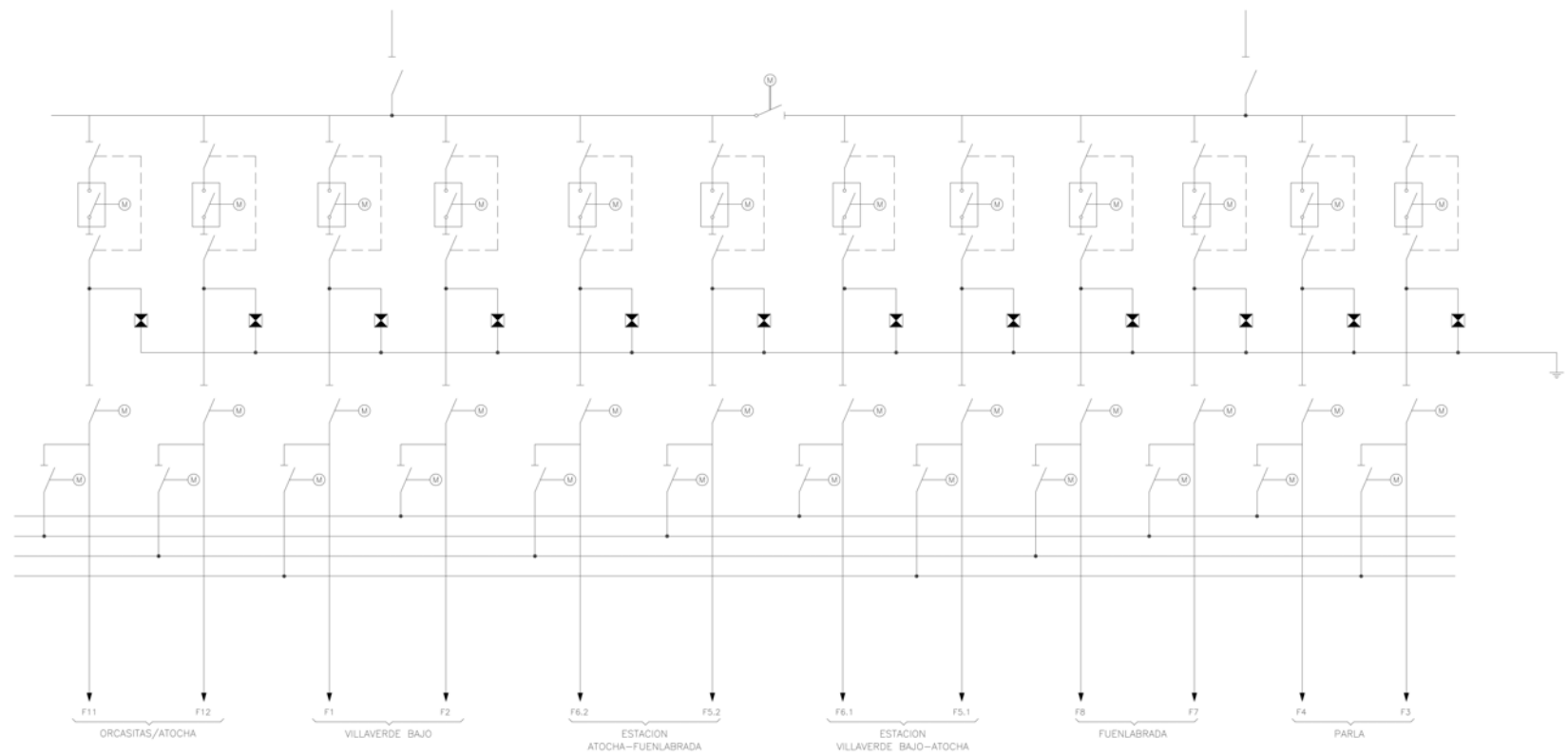
| | | |
|-----------|------------------------------|-------------------|
| FEDATARIO | 24/07/2014 | |
| NOMBRE | EVA VERZEL MEDINA | |
| ESCALA | TÍTULO DEL PLANO | Nº de plano 23 |
| S/E | SECCIÓN DEL PARQUE INTENSIVO | Nº de hoja 1 de 1 |



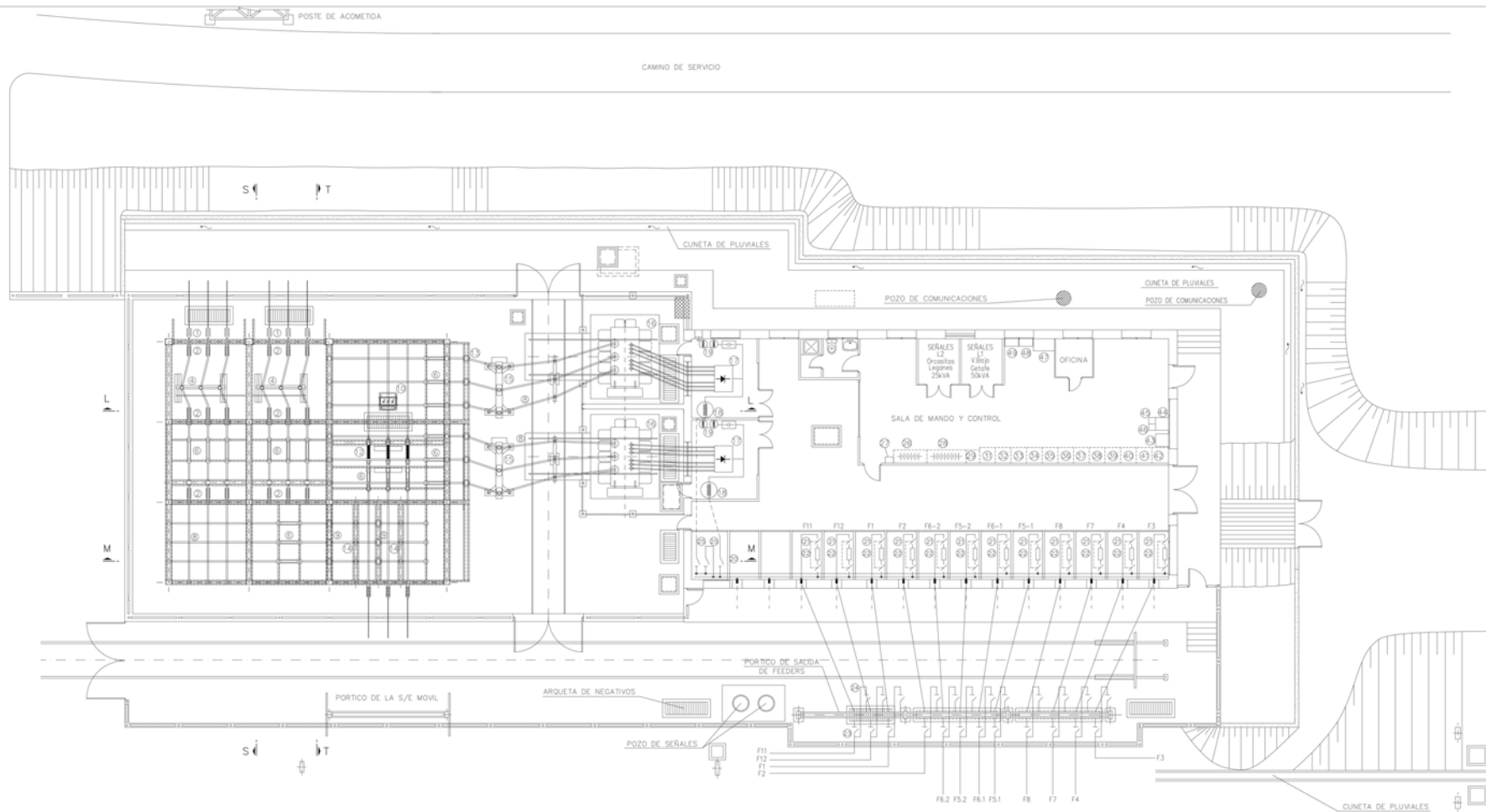
| Nº | DESCRIPCION |
|----|--|
| 1 | SECCIONADORES UNIPOLARES EXTERIORES PARA PARARRAYOS. 52kV. |
| 2 | PARARRAYOS AUTOVALVULA EXTERIOR. |
| 3 | EMBARRADO TUBULAR DESNUDO. |
| 4 | DISYUNTOR TRIPOLAR AUTOMATICO EXTERIOR. 52 kV. |
| 5 | SECCIONADOR TRIPOLAR EXTERIOR TELEMANDADO 52 kV. |
| 6 | TRANSFORMADOR INTENSIDAD PROTECCION 52 kV. 300-150/5A. |
| 7 | RELES DE SOBREENTENSIDAD A TIEMPO INVERSO E INSTANTANEO. |
| 8 | SECCIONADOR TRIPOLAR EXTERIOR 52kV. |
| 9 | TRANSFORMADOR INTENSIDAD MEDIDA EXTERIOR 52kV. 300-150/5A. |
| 10 | TRIAFO TENSION EXTERIOR 45000/110V. |
| 11 | RELES DE SOBREENTENSIDAD TIEMPO INDEPENDIENTE E INSTANTANEO. |
| 12 | TUBO COBRE 30/35MM. Ø. |
| 13 | BASES PORTAFUSIBLES CON SU FUSIBLE DE PROTECCION. 52kV. |
| 14 | TRANSFORMADOR POTENCIA 6600KVA 45/1,3-13kV. |
| 15 | RECTIFICADOR 600kW. 3300V. |
| 16 | BOBINA AMORTIGUAMIENTO 1820A. 0.6MH. |
| 17 | EQUIPO FILTRADO ARMONICOS 600-1200HZ. |
| 18 | CELDA SECCIONADOR GRUPO Y ACOPLAMIENTO OMNIBUS. |
| 19 | CELDA FEEDER. |
| 20 | ARMARIO BAJA TENSION S/AUXILIARES. |
| 21 | POZO NEGATIVOS. |
| 22 | RELE MASA. |
| 23 | SECCIONADOR BY-PASS. |
| 24 | SECCIONADOR FEEDER. |
| 25 | BARRAS BY-PASS. |
| 26 | DETECTORES TENSION. |
| 27 | BARRAS OMNIBUS |
| 28 | TRANSFORMADOR SERVICIOS AUXILIARES. |

| | | |
|--------|---------------------------------------|----------------------------------|
| FECHA | 24/07/2014 | Universidad Carlos III de Madrid |
| NOMBRE | EVA VERGEL ARDIA | |
| ESCALA | TRUZO DEL PLANO | 1º de 2000 51 |
| S/E | SITUACION PROYECTIVA ESQUEMA UNIFILAR | 1º de 1000 1 de 2 |

HASTA UN TOTAL DE 12 FEEDERS INSTALADOS Y 2 DE RESERVAS NO INSTALADOS



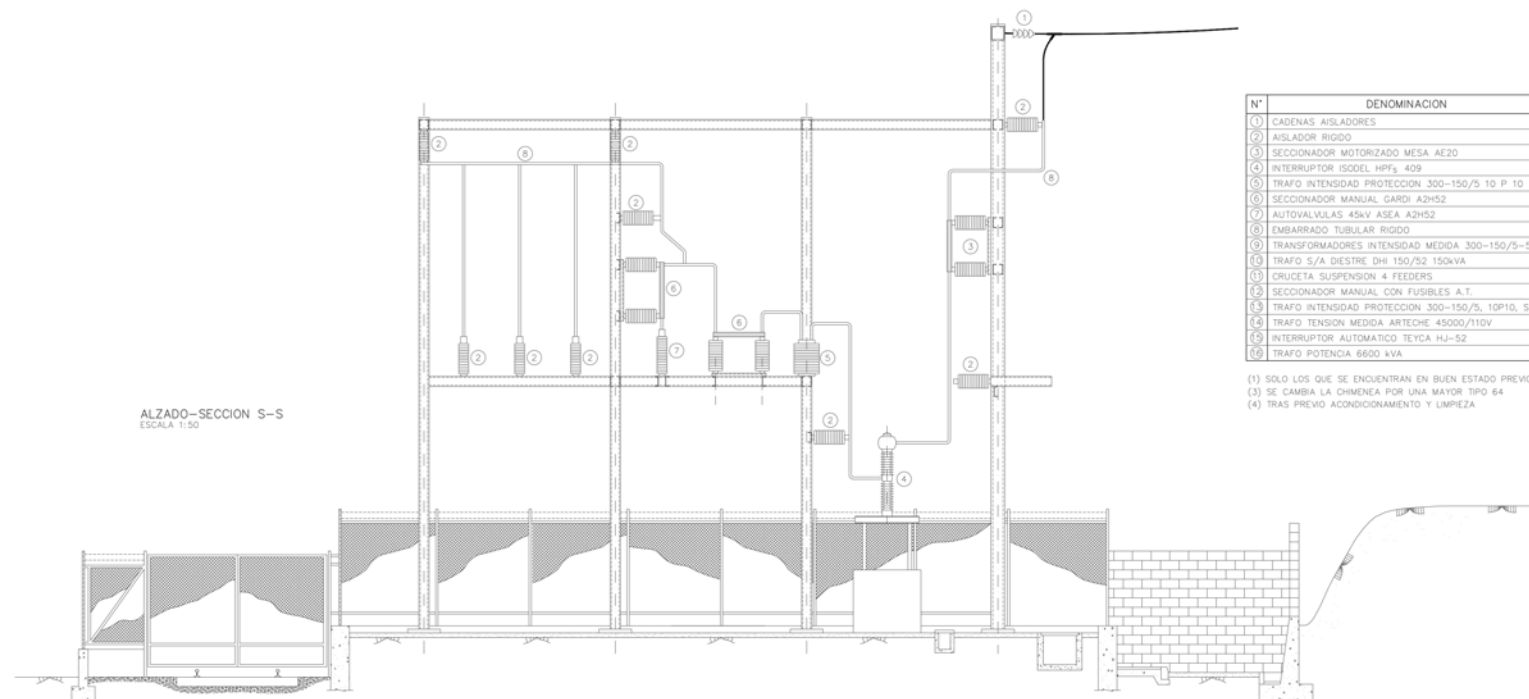
| | | |
|--------|--|---|
| FECHA | 24/07/2014 |  Universidad Carlos III de Madrid |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | |
| ESCALA | TÍTULO DEL PLANO | 9° de plano 3.1 |
| S/E | ESTADO PROYECTADO UNIFILAR CORRIENTE CONTINUA | 9° de hoja 2 de 2 |



| N° | DENOMINACION | REUTILIZACION | N° | DENOMINACION | REUTILIZACION | N° | DENOMINACION | REUTILIZACION |
|------|--|---------------|-------|---|-------------------------|------|---|---------------|
| (1) | CADENAS AISLADORES | SI (1) | (18) | EQUIPO DE FILTRADO 600Hz Y 1200Hz | ACOIADO | (36) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS 12 Y 11 | NUEVO |
| (2) | AI SLADOR RIGIDO | SI (1) | (20) | SECCIONADOR C.C. | ACOIADO | (39) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS 6.1 Y 6.2 | NUEVO |
| (3) | SECCIONADOR MOTORIZADO MESA AE20 | SI (4) | (21) | SECCIONADOR MANUAL BIPOLAR | ACOIADO | (40) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS F5.1 Y F5.2 | NUEVO |
| (4) | INTERRUPTOR ISODEL HPF5 409 | SI (4) | (22) | EXTRARRAPIDO APENA WS E/H | SI (4) | (41) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS F7 Y F8 | NUEVO |
| (5) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION 300-150/5 10 P 10 | ACOIADO | (22*) | EXTRARRAPIDO UR26-64 | SI (3) | (42) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS F3 Y F4 | NUEVO |
| (6) | SECCIONADOR MANUAL GARDI A2H52 | SI (4) | (22*) | EXTRARRAPIDO ANSALDO | SI (4) | (43) | ARMARIO RELES INTERMEDIOS | NUEVO |
| (7) | AUTOVALVULAS 45kV ASEA A2H52 | SI (4) | (23) | SECCIONADOR SALIDA FEEDER | SI (4) FEEDER 1,3,11,12 | (44) | ARMARIO MANDO Y CONTROL GRUPOS | NUEVO |
| (8) | EMBARRADO TUBULAR RIGIDO | SI (1) | (24) | SECCIONADOR BY-PASS | SI (4) FEEDER 1,3,11,12 | (45) | ARMARIO MANDO Y CONTROL SERVICIOS AUXILIARES Y MEDIDA | NUEVO |
| (9) | TRANSFORMADORES INTENSIDAD MEDIDA 300-150/5-5A | ACOIADO | (25) | SUBIDA POSITIVOS | NUEVO | (46) | ARMARIO MANDO Y CONTROL LLEGADAS | NUEVO |
| (10) | TRAFO S/A DIESTRE DHE 150/52 150kVA | SI (4) | (26) | BATERIA ANTIGUA 60A.h + CARGADOR | SI (4) | (47) | TELEMANDO SAINCO | SI (4) |
| (11) | CRUCETA SUSPENSION 4 FEEDERS | SI (4) | (27) | COMUTADOR BATERIAS | SI (4) | (48) | ARMARIO DE PROTECCIONES | SI (4) |
| (12) | SECCIONADOR MANUAL CON FUSIBLES A.T. | NUEVO | (28) | BATERIA PRINCIPAL 65 A.h + CARGADOR 25A | SI (4) | (49) | SAI TELEMANDO | SI (4) |
| (13) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION 300-150/5, 10P10, S2kV | ACOIADO | (29) | ARMARIO DETECTOR DE TENSION | SI (4) | (50) | SAI ARRASTRES | SI (4) |
| (14) | TRAFO TENSION MEDIDA ARTECHE 45000/110V | SI (4) | (30) | ARMARIO MANDO Y CONTROL SEALES | NUEVO | (51) | REPARTIDOR COMUNICACIONES | NUEVO |
| (15) | INTERRUPTOR AUTOMATICO TEYCA HJ-52 | SI (4) | (31) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS (RESERVA) | NUEVO | (52) | SELECTIVO | NUEVO |
| (16) | TRAFO POTENCIA 6600 kVA | ACOIADO | (32) | ARMARIO MANDO Y CONTROL FEEDERS 2 Y 1 | NUEVO | (53) | SAI | SI |
| (17) | RECTIFICADOR 6000 kW | ACOIADO | | | | | | |
| (18) | BOBINA 1820A 1.3 mH | ACOIADO | | | | | | |

- (1) SOLO LOS QUE SE ENCUENTRAN EN BUEN ESTADO PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA
 (2) SE CAMBIA LA CHIMENEA POR UNA MAYOR TIPO 64
 (4) TRAS PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA

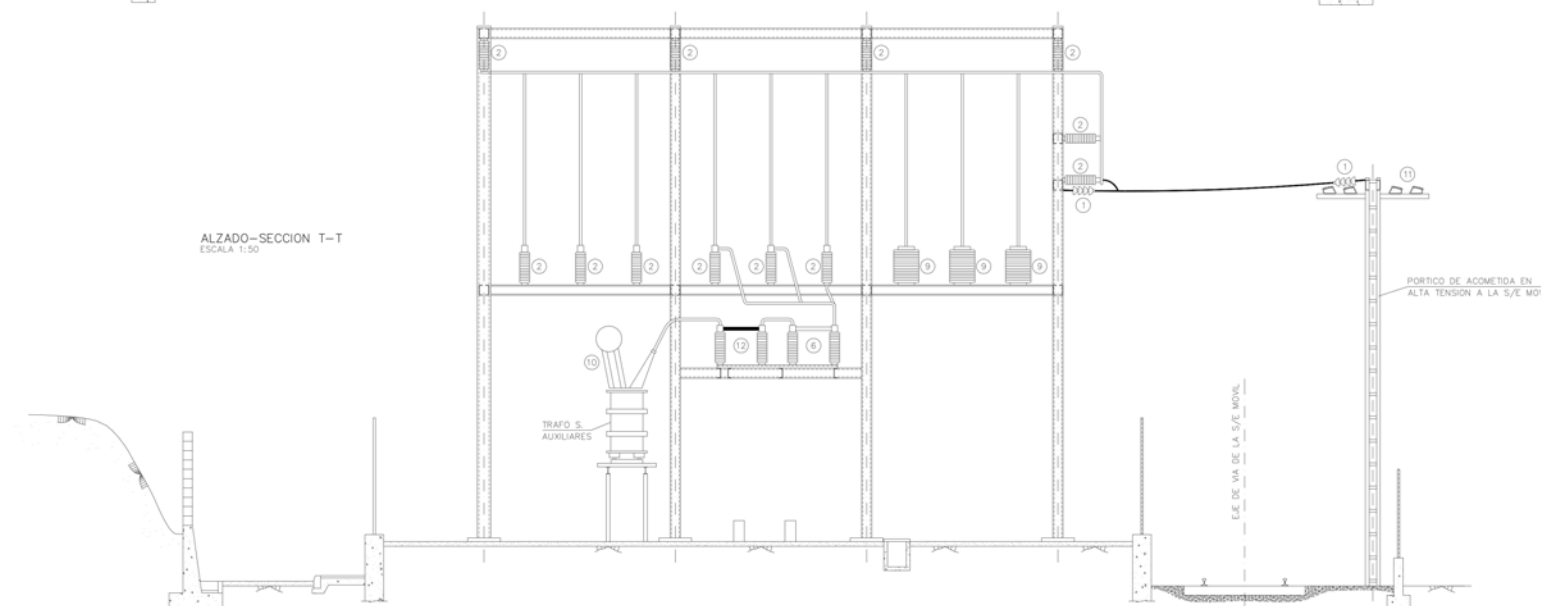
| | | | |
|------------------|-------------------|--|--------------|
| FECHA | 24/07/2014 | | 32 1 de 1 |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| TITULO DEL PLANO | PLANTA PROYECTADA | | |



ALZADO-SECCION S-S
ESCALA 1:50

| Nº | DENOMINACION | REUTILIZACION |
|------|--|---------------|
| (1) | CADENAS AISLADORES | SI (1) |
| (2) | AISSADOR RIGIDO | SI (1) |
| (3) | SECCIONADOR MOTORIZADO MESA AE20 | SI (4) |
| (4) | INTERRUPTOR ISODEL HPF ₃ 409 | SI (4) |
| (5) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION 300-150/S 10 P 10 | ACOPADO |
| (6) | SECCIONADOR MANUAL GARDI A2H52 | SI (4) |
| (7) | AUTOVALVULAS 45kV ASEA A2H52 | SI (4) |
| (8) | EMBARRADO TUBULAR RIGIDO | SI (1) |
| (9) | TRANSFORMADORES INTENSIDAD MEDIDA 300-150/S-5A | ACOPADO |
| (10) | TRAFO S/A DESTRE DH 150/S2 150kVA | SI (4) |
| (11) | CRUCETA SUSPENSION 4 FEEDERS | SI (4) |
| (12) | SECCIONADOR MANUAL CON FUSIBLES A.T. | NUEVO |
| (13) | TRAFO INTENSIDAD PROTECCION 300-150/S, 10P10, S2kV | ACOPADO |
| (14) | TRAFO TENSION MEDIDA ARTECHE 45000/110V | SI (4) |
| (15) | INTERRUPTOR AUTOMATICO TEYCA HJ-52 | SI (4) |
| (16) | TRAFO POTENCIA 6600 kVA | ACOPADO |

(1) SOLO LOS QUE SE ENCUENTRAN EN BUEN ESTADO PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA
(3) SE CAMBIA LA CHIMENEA POR UNA MAYOR TIPO 64
(4) TRAS PREVIO ACONDICIONAMIENTO Y LIMPIEZA

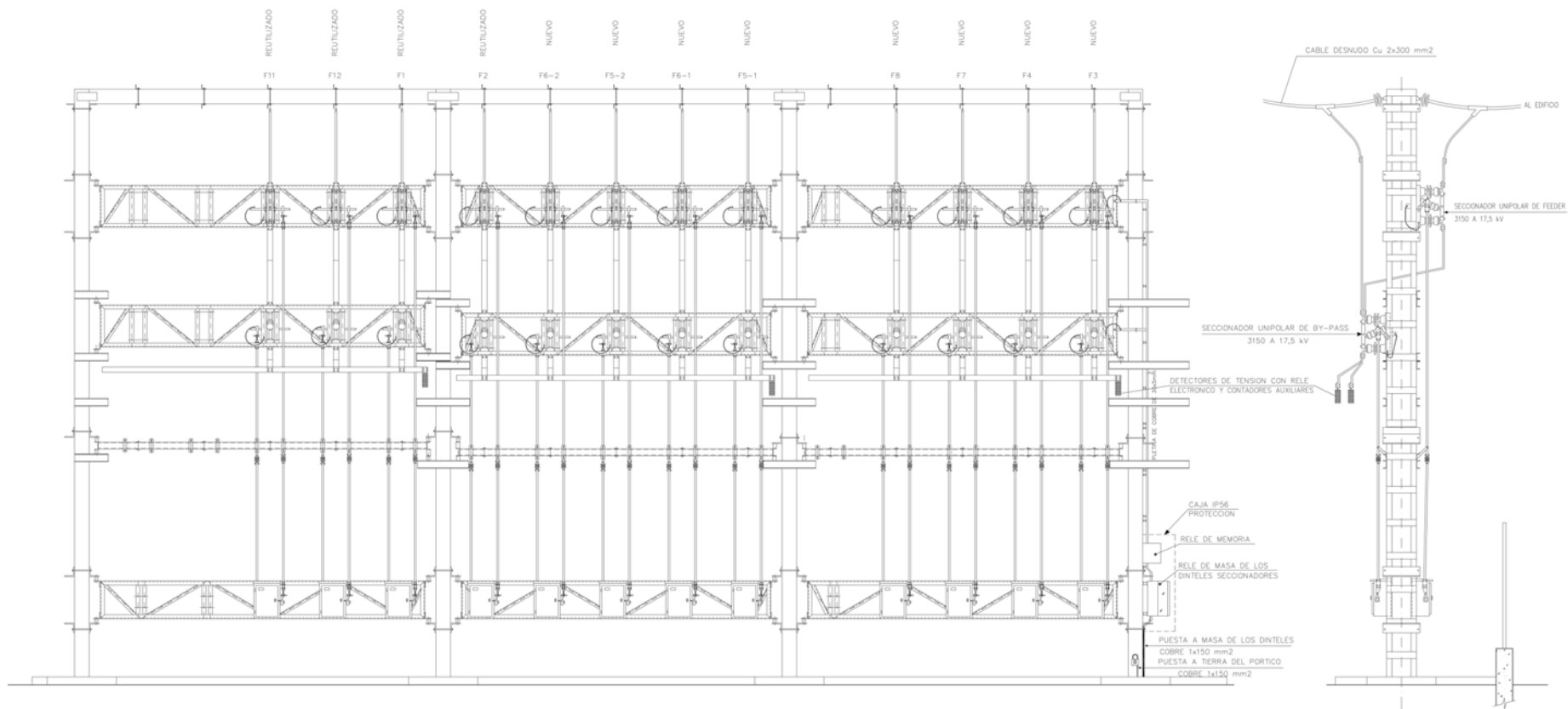


ALZADO-SECCION T-T
ESCALA 1:50

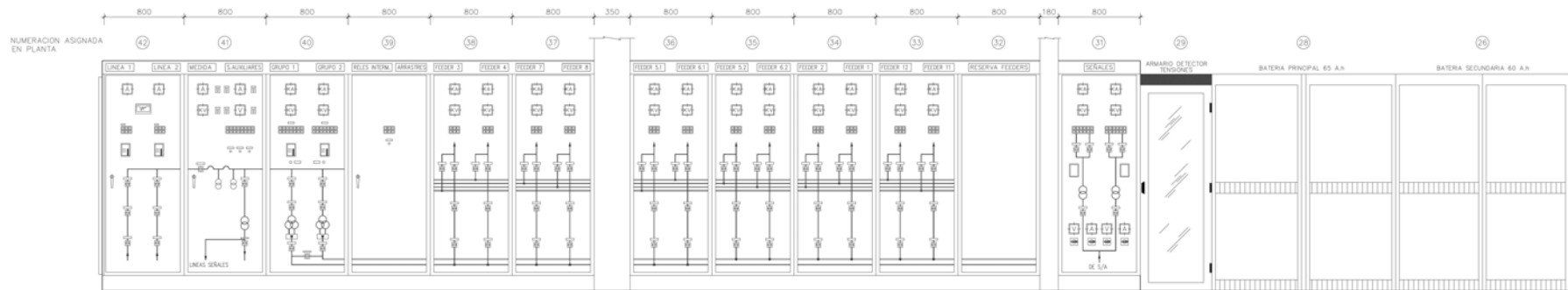
PORTICO DE ACOMETIDA EN
ALTA TENSION A LA S/E MOVIL

E.L.E. DE VIA DE LA S/E MOVIL

| | | |
|--------|---------------------------------------|-------------------|
| FECHA | 24/07/2014 | |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | |
| ESCALA | TITULO DEL PLANO | 8º de plano 3.3 |
| S/E | SITUACION PROYECTADA PLANTA INTERFERE | 8º de hoja 1 de 1 |



| | | |
|--------|--------------------|-------------------|
| FECHA | 24/07/2014 | |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | |
| ESCALA | TITULO DEL PLANO | 9" de plano 1:1 |
| 1/E | PORTICO DE FEEDERS | 9" de hoja 1 de 1 |



| | | |
|--------|------------------------|---|
| FECHA | 24/07/2014 |  Universidad Carlos III de Madrid |
| NOMBRE | EVA VERGEL MEDINA | |
| ESCALA | TITULO DEL PLANO | 8º de plano 1/8 |
| S/E | POSICION DE LAS CELDAS | 8º de hoja 1 de 1 |